

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
ENERGY INSTITUTE

# ZVÝŠENÍ VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA BPS POMOCÍ PARNÍHO MOTORU

INCREASING OF ELECTRICITY PRODUCTION IN BGS USING STEAM ENGINE

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. JIŘÍ NAHODIL

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MARTIN LISÝ, Ph.D.

BRNO 2012



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Energetický ústav

Akademický rok: 2011/12

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Jiří Nahodil

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Energetické inženýrství (2301T035)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Zvýšení výroby elektrické energie na BPS pomocí parního motoru**

v anglickém jazyce:

### **Increasing of electricity production in BGS using steam engine**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student se seznámí se základními principy fungování kogenerace ve spojení s bioplynovými stanicemi a také s principem malých tepelných motorů. Stěžejní částí práce bude samostatný návrh možnosti zvýšení výroby elektřiny při kogeneraci z bioplynu pomocí parního motoru a porovnání takovéto úpravy s dalšími možnostmi zvýšení výroby el. energie.

Cíle diplomové práce:

Provést řešerži o výrobě a využití bioplynu se zaměřením na kogeneraci

Provést řešerži o možnostech zvýšení podílu výroby elektrické energie při kogeneraci z bioplynu

Posoudit možnost zvýšení výroby elektrické energie pomocí parního motoru, posoudit přínosy a zápory takovéto aplikace

Seznam odborné literatury:

J. Škorpík, Pístový parní motor, on-line pokračující zdroj Transformační technologie, ISSN 1804-8293, 2010

Jandačka, Malcho: Technologie pre zvyšovanie energetického potenciálu biomasy, TU Zvolen

Kadrnožka: Lopatkové stroje, Skriptum VUT v Brně


Internetové zdroje

Vedoucí diplomové práce: Ing. Martin Lisý, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/12.

V Brně, dne 15.11.2011



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Zdeněk Skála, CSc.  
Ředitel ústavu

  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.  
Děkan



## ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá možnostmi využití odpadního tepla při výrobě elektrické energie a to se zaměřením na bioplynové stanice, kde je produkován bioplyn využíván převážně spalováním v kogeneračních jednotkách se spalovacími pístovými motory. První část je věnována samotným bioplynovým stanicím. Je zde uvedeno jejich rozdělení, samotný proces vzniku bioplynu a jeho zpracování. Další část je zaměřena na kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Jsou zde uvedeny její principy a popsány jednotlivé druhy kogeneračních technologií. Dále jsou uvedeny konkrétní možnosti pro využití odpadního tepla na bioplynové stanici. V poslední části jsou uvedeny návrhy na zvýšení výroby elektrické energie na BPS pomocí parního motoru a je provedeno ekonomické hodnocení těchto návrhů.

### Klíčová slova

Bioplynová stanice, bioplyn, kogenerace, odpadní teplo, parní motor

## ABSTRACT

This thesis deals with the possibilities of using waste heat for power generation with a focusing on biogas plants (BGS). The produced biogas is mainly used for combustion in cogeneration units with internal combustion piston engines. The first part this paper describes the biogas plants. The division of BGS and the biogas processing is mentioned there. Another part is focused on the combined production of electricity and heat. The principles and description various types of cogeneration technologies are presented here. The following are specific options for waste heat utilization for biogas plants. The last section contains proposals to increase electricity production by the BGS with the steam engine and economic evaluation of these proposals is made.

### Key words

Biogas plant, biogas, cogeneration, waste heat, steam engine

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

NAHODIL, J. *Zvýšení výroby elektrické energie na BPS pomocí parního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne: .....

Podpis: .....

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Lisému, Ph.D. za cenné rady, připomínky a metodické vedení práce.

## OBSAH

<b>1</b>	<b>BIOPLYNOVÉ STANICE.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBECNÉ ROZDĚLENÍ BIOPLYNOVÝCH STANIC.....	13
1.1.1	<i>Zemědělské BPS.....</i>	13
1.1.2	<i>Čistírenské.....</i>	13
1.1.3	<i>Ostatní.....</i>	13
1.2	ANAEROBNÍ FERMENTACE .....	13
1.2.1	<i>Proces anaerobní fermentace.....</i>	14
1.3	BIOPLYN.....	15
1.3.1	<i>Skládkový plyn .....</i>	15
1.4	STRUKTURA BIOPLYNOVÉ STANICE.....	15
1.4.1	<i>Bioplynové technologie.....</i>	15
1.4.2	<i>Základní prvky bioplynové stanice.....</i>	16
<b>2</b>	<b>KOMBINOVANÁ VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE A TEPLA .....</b>	<b>18</b>
2.1	CHARAKTERISTICKÉ UKAZATELE ZDROJŮ KOGENERACE .....	18
2.1.1	<i>Teplárenský modul.....</i>	18
2.1.2	<i>Účinnosti zdrojů kogenerace .....</i>	18
2.1.3	<i>Doba provozu a roční doba využití maximálního výkonu .....</i>	19
2.1.4	<i>Úspora primárního paliva.....</i>	19
2.2	DRUHY KOGENERAČNÍCH TECHNOLOGIÍ .....	20
2.2.1	<i>Parní turbíny.....</i>	21
2.2.2	<i>Plynové turbíny.....</i>	21
2.2.3	<i>Spalovací pístové motory.....</i>	22
2.2.4	<i>Ostatní technologie .....</i>	23
2.3	PODMÍNKY UPLATNĚNÍ KOGENERAČNÍHO ZDROJE .....	25
<b>3</b>	<b>MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA NA BPS .....</b>	<b>27</b>
3.1	TEPLOVZDUŠNÉ SUŠENÍ.....	27
3.2	ABSORPČNÍ CHLAZENÍ .....	28
3.2.1	<i>Princip absorpčního chlazení .....</i>	28
3.3	ZVÝŠENÍ PODÍLU VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE.....	29
3.3.1	<i>Parní motor.....</i>	29
3.3.2	<i>ORC cyklus .....</i>	33
3.3.3	<i>Termoelektrický generátor .....</i>	34
<b>4</b>	<b>KONKRÉTNÍ NÁVRH NA ZVÝŠENÍ VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA BPS .....</b>	<b>35</b>
4.1	BIOPLYNOVÁ STANICE KOUTY.....	35
4.1.1	<i>Popis stávající technologie .....</i>	35
4.1.2	<i>Návrh na zlepšení ekonomie provozu využitím parního motoru .....</i>	36
4.1.3	<i>Energetická bilance stávajícího provozu.....</i>	37
4.1.4	<i>Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 50 kW.....</i>	37
4.1.5	<i>Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 100 kW.....</i>	42

---

4.2	BIOPLYNOVÁ STANICE VĚTRNÝ JENÍKOV .....	46
4.2.1	<i>Popis stávající technologie .....</i>	46
4.2.2	<i>Návrh na zlepšení ekonomie provozu využitím parního motoru .....</i>	47
4.2.3	<i>Energetická bilance stávajícího provozu.....</i>	48
4.2.4	<i>Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 50 kW.....</i>	48
4.2.5	<i>Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 100 kW.....</i>	53
4.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S TECHNOLOGIÍ ORC .....	58
4.3.1	<i>BPS Kouty.....</i>	58
4.3.2	<i>BPS Větrný Jeníkov.....</i>	59
4.3.3	<i>Hodnocení výsledků .....</i>	59
4.3.4	<i>Porovnání parního motoru a ORC cyklu .....</i>	60
5	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>61</b>
6	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>62</b>
7	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....</b>	<b>64</b>

## ÚVOD

Využívání elektrické energie a tepla je v dnešní době běžnou a těžko nahraditelnou součástí života. Spotřeba energií stále narůstá a i do budoucna se předpokládá její strmý vzestup.

Elektrickou energii můžeme považovat za nejkvalitnější druh energie, kdy je možné ji téměř beze ztrát transformovat na jiné formy energie např. mechanickou, tepelnou atd. a využívat ji tak k nejrůznějším účelům. Její přenos je také snadno realizovatelný a to na velké vzdálenosti od místa její výroby. Výroba elektrické energie je však poměrně technicky náročná, kdy se převážně využívá transformace tepelné energie uvolněné z primárních energetických zdrojů a to s ne příliš vysokou účinností. Z technického hlediska je také velmi obtížné elektrickou energii ve větším množství akumulovat. Naopak tepelná energie je energie méněhodnotná. Její použití a přenos jsou značně omezené a přeměna na kvalitnější druh energie je technicky obtížná a je možné ji uskutečnit pouze částečně. Ale získání tepelné energie je však poměrně jednoduché a levné a tepelnou energii je možné celkem snadno akumulovat.

Obě formy energie lze získávat buď odděleně, v tomto případě je však výroba elektrické energie zatížena značnými ztrátami, nebo za vhodných podmínek sdruženě (kombinovaně), kdy jsme schopni využít určitou část odpadního tepla při výrobě elektrické energie. Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla se stala obecně uznávaným způsobem výroby energií, který vede k úsporám primárních energetických zdrojů a s tím souvisejícímu snížení zatížení životního prostředí. Kombinovaná výroba elektřiny a tepla (kogenerace) se dnes uplatňuje zejména v malých decentralizovaných zdrojích, tak aby produkované teplo bylo co nejbližší odběrateli a mohlo tak být efektivně využito. U nás v ČR je však velmi rozvinutá i tzv. velká kogenerace – teplárenství s rozsáhlými sítěmi centrálního zásobování teplem.

Získávání elektrické energie a tepla je dnes stále velmi závislé na využívání fosilních paliv. Je obecně známo, že zásoby fosilních paliv se zmenšují, jejich těžba je stále nákladnější a roste tak i jejich cena. V současné době je tak stále více podporována výroba elektrické energie z obnovitelných zdrojů a to i z hlediska ochrany životního prostředí. Na tuto podporu u nás velice rychle zareagoval i trh s bioplynem, kdy během několika let vzrostl počet bioplynových stanic z několika málo provozů na více než 300 stanic s celkovým instalovaným výkonem větším než 200 MW. A podle odhadů se se budou tato čísla ještě zvyšovat. U většiny bioplynových stanic je bioplyn využíván spalováním v moderních kogeneračních jednotkách, jejichž výstupem je elektrická energie dodávaná do distribuční sítě nebo pro vlastní spotřebu a teplo získávané chlazením motoru a dochlazováním spalín.

Bioplynové stanice bývají projektovány na trvalý provoz a jejich výkony odpovídají množství produkovaného bioplynu. Tyto stanice produkují i poměrně velké množství tepla. Provozovatelé se tak často setkávají s problémem, jak toto teplo efektivně zužitkovat, tak aby byla dodržena základní myšlenka kogenerace. Produkované teplo tak bývá v menším či větším množství mařeno. Problém je to i z toho pohledu, že je tak využita jen malá část energie v bioplynu obsažené, i když velký podíl vstupních substrátů pro bioplynovou stanici může být záměrně pěstován na orné půdě a to pouze k tomuto účelu. Existují však možnosti a vhodné doprovodné technologie, pomocí nichž je možné zajistit odběr tepla, popřípadě vyrovnat odběr tepla mezi zimními a letními měsíci.

Cílem této práce je shrnout proces výroby bioplynu v bioplynových stanicích, dále možnosti využití bioplynu se zaměřením na kogeneraci. V práci jsou uvedeny základní principy a fungování kogenerace a popis jednotlivých kogeneračních technologií. Hlavní část je věnována problematice využívání odpadního tepla na bioplynových stanicích, s popisem možných způsobů jeho využití a se zaměřením na vhodné technologie, pomocí nichž je

možné zvýšit výrobu elektrické energie. V praktické části je pak provedeno hodnocení projektu na zvýšení výroby elektrické energie pomocí parního motoru a to zejména z ekonomického hlediska. Výsledky jsou porovnány s jinou technologií na zvýšení výroby elektrické energie z odpadního tepla, technologií ORC.



# 1 BIOPLYNOVÉ STANICE

Moderní bioplynová stanice (dále jen BPS) je zařízení, které umožňuje zpracovávat různé druhy organických materiálů nebo odpadů. Vstupní materiál podléhá anaerobní fermentaci (kontrolovaná přeměna organických látek bez přístupu vzduchu), jejímž produktem je bioplyn a digestát. Bioplyn je pak ve většině případů využíván jako energetická surovina pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla. Digestát (tuhý zbytek z anaerobní fermentace) lze vhodně využít jako kvalitní organické hnojivo. [1]

## 1.1 Obecné rozdělení bioplynových stanic

BPS obecně dělíme podle zpracovávaného materiálu, ať už se jedná o suroviny, odpady nebo vedlejší produkty výroby na:

- 1) Zemědělské
- 2) Čistírenské
- 3) Ostatní

### 1.1.1 Zemědělské BPS

Jsou to takové bioplynové stanice, které zpracovávají vstupy ze zemědělské výroby. Jedná se o materiály rostlinného charakteru – sláma obilovin, natě různých druhů plodin, seno, nezkrmitelné rostlinné materiály atd., ale i cíleně pěstované plodiny k energetickému využití (např. kukuřice) a to jak čerstvé tak silážované. Materiály živočišného charakteru – kejda, hnůj, stelivo apod. Tyto BPS jsou většinou situovány ve stávajících zemědělských provozech. [1] [2]

### 1.1.2 Čistírenské

Tyto BPS zpracovávají pouze kaly z čistíren odpadních vod a jsou nedílnou součástí těchto čistíren. Anaerobní fermentace je využívána za účelem stabilizace kalu vznikajícího na ČOV. Do tohoto zařízení nevstupují žádné jiné materiály, než samotné kaly z ČOV, žump a septiků a odpadní voda. [2]

### 1.1.3 Ostatní

Jsou to stanice, které zpracovávají ostatní vstupy. Mohou to být také rizikové vstupy jako například jateční odpady, tuky, odpady z různých potravinářských výrob atd. U těchto zařízení musí být pečlivě zvolena technologie zpracování a musí se dodržovat přísná hygienická pravidla.

## 1.2 Anaerobní fermentace

Anaerobní fermentaci je možno definovat jako soubor procesů, při nichž směsná kultura mikroorganismů postupně rozkládá biologicky rozložitelnou organickou hmotu bez přístupu vzduchu. Výsledným produktem těchto procesů je směs plynů (bioplyn) a nerozložitelný zbytek organické hmoty (digestát). [3]

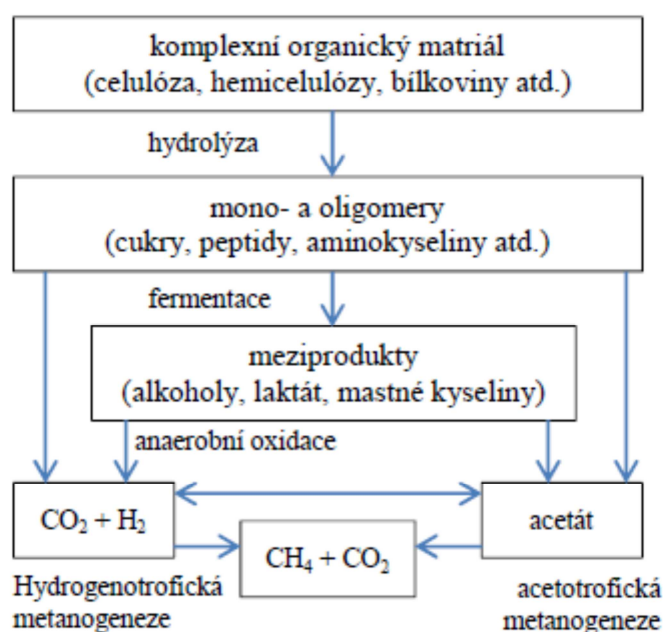
Je to tedy velmi složitý biologický proces, kterého se účastní mnoho různých typů bakterií. Tento proces probíhá v několika základních na sebe navazujících fázích. V každé fázi se uplatňuje určitá skupina anaerobních mikroorganismů (bakterií). Produkt jedné skupiny bakterií se stává substrátem skupiny druhé, a proto jsou tyto fáze úzce spojeny a jsou na sobě závislé.

Celý proces probíhá přibližně 20-30 dní za určitých podmínek (bez přístupu vzduchu, za určité teploty, reakce prostředí pH, přítomnost určitých prvků atd.)

### 1.2.1 Proces anaerobní fermentace

Proces anaerobní fermentace je charakterizován čtyřmi fázemi přeměny:

1. **Hydrolýza** – makromolekulární organické látky (bílkoviny, uhlovodíky, tuk, celulóza) jsou pomocí enzymů, produkovaných hlavně fermentačními bakteriemi, rozkládány na nízkomolekulární sloučeniny (jednoduché cukry, aminokyseliny)
2. **Acidogeneze** – produkty hydrolýzy jsou dále rozkládány na jednodušší organické sloučeniny ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ , alkoholy).
3. **Acetogeneze** – působením octotvorných bakterií dochází ke vzniku kyseliny octové a další produkci  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ .
4. **Metanogeneze** – působením metanových bakterií vzniká metan, dále vzniká  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ .



Obr. 1-1 Schéma reakcí probíhajících při vzniku bioplynu [4]

Životnost jednotlivých druhů bakterií a tedy i celková stabilita procesu anaerobní fermentace je závislá na mnoha faktorech. Mezi tyto faktory patří teplota, hodnota pH, přítomnost výživných látek (nutrientů – příznivě ovlivňují biologický proces, musí však být dodržen určitý poměr), přítomnost inhibujících a toxických látek (tyto naopak nepříznivě ovlivňují biologický proces).

Významný vliv na probíhající reakce má teplota. Změnou teploty se mění rychlost probíhajících reakcí (při vyšší teplotě dochází rychleji k rozkladu substrátu). Změna rychlosti však může vést k porušení rovnováhy probíhajícího procesu, což může mít za následek úplnou havárii procesu. K tvorbě metanu dochází v širokém rozsahu teplot (přibližně 5 až 95 °C), při nižších teplotách metanové bakterie sice přežívají, ale neprodukují metan. Rozeznáváme tři základní teplotní oblasti pro tvorbu metanu – oblast **psychrofilní** (10-20 °C), oblast **mezofilní** (25-40 °C) a oblast **termofilní** (45-60 °C). V praxi pracuje většina reaktorů v mezofilní oblasti (např. zpracovávající hnůj prasat a hovězího dobytka) nebo v termofilní oblasti (zpracovávající kaly na ČOV). Lze konstatovat, že pro udržení stability procesu je nutné zabezpečit konstantní teplotu. [3] [5]

Významným limitujícím faktorem je též hodnota pH. Optimální prostředí pro metanové bakterie je v neutrální oblasti (tj. pH 6,5-7,5). Mimo tuto oblast je činnost bakterií negativně ovlivněna. Do kyselých substrátů je třeba přidávat alkalizační činidla (např. vápno), aby se substrát zneutralizoval.

### 1.3 Bioplyn

Bioplynem můžeme označit plynný produkt anaerobní metanové fermentace organických látek uváděné též pod pojmy anaerobní digesce, biometanizace, biogasifikace anebo vyhnívání (u čistírenských kalů). Názvem „bioplyn“ je obecně míněna plynná směs metanu a oxidu uhličitého. [6]

Ideální bioplyn je tedy tvořen směsí  $\text{CH}_4$  a  $\text{CO}_2$ , kdy metan tvoří převážnou část. V praxi obsahuje bioplyn celou řadu dalších plynů jako například zbytky vzdušných plynů ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar), produkty acidogeneze ( $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2$ ), vodní páru a další.

složka	Zastoupení [%]
Metan	40-75
Oxid uhličitý	25-55
Vodní pára	0-10
Dusík	0-5
Kyslík	0-2
Vodík	0-1
Čpavek	0-1
Sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0-1

Tab. 1-1 Složení bioplynu [4]

Výhřevnost (respektive spalné teplo) bioplynu je dána obsahem spalitelných plynů (metan, vodík). Nepříjemný je obsah sulfanu, který při spalování oxiduje na oxid siřičitý a může docházet k nízkoteplotní korozi výhřevných ploch. Obsah sulfanu lze snížit řízeným přidavkem vzduchu (kyslíku) do fermentoru. Bioplyn může obsahovat také sloučeniny křemíku, které spálením vytvoří tuhý oxid křemičitý, jenž může způsobit zadření motoru.

Bioplyn se dá celkem snadno zbavit těchto příměsí a oxidu uhličitého a získat tak čistý metan, to se používá jen v ojedinělých případech, většinou je využíván tak, jak vznikne.

#### 1.3.1 Skládkový plyn

Někdy označován jako bioplyn, jindy jako samostatný obnovitelný zdroj. V každém případě dochází v tělese skládky, která obsahuje biologicky rozložitelný materiál, ke stejným procesům anaerobní fermentace, podobně jako ve fermentačním reaktoru. Tento plyn tak může být jímán odplyňovacím systémem a být využíván k energetickým účelům. Parametry skládkového plynu jsou však horší jako u klasického reaktorového bioplynu. Kvalita a množství produkovaného plynu závisí na klimatických podmínkách, stáří a stupni rozkladu skládky, složení skládky. Produkce plynu postupně s časem klesá.

### 1.4 Struktura bioplynové stanice

#### 1.4.1 Bioplynové technologie

Podle obsahu sušiny je možno bioplynové technologie rozdělit na dvě základní skupiny:

1. **Mokrá fermentace** – využívá se pro zpracování biomasy s obsahem sušiny pod 12 %. Optimum pro stabilitu reakcí je 8-10 % obsahu sušiny. Tuto technologii využívá většina zemědělských bioplynových stanic.
2. **Suchá fermentace** – využívá se pro zpracování biomasy s obsahem sušiny 20-60 %, optimum se pohybuje v rozmezí 30-35 %. Většinou se jedná o aplikace mezofilního anaerobního procesu s rozsahem reakčních teplot 35-40 °C. Suchá fermentace je méně obvyklá, byla původně navržena pro zpracování komunálních bioodpadů, používá se u substrátů, které nelze mokrou cestou jednoduše zpracovat (podestýlky na bázi pilin, nedokonale vytríděné bioodpady s různými příměsemi).

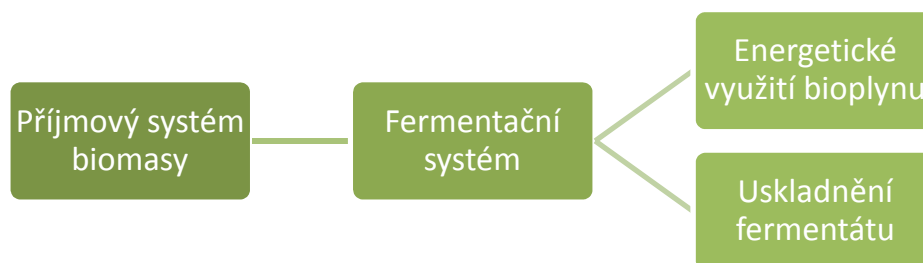
Podle dávkování substrátu do fermentačních reaktorů lze bioplynové technologie rozdělit na:

1. **Diskontinuální** – cyklické dávkování substrátu, doba jednoho cyklu odpovídá době zdržení materiálu ve fermentoru. Používá se hlavně při suché fermentaci.
2. **Semikontinuální** – doba mezi jednotlivými dávkami je kratší než doba zdržení ve fermentoru. Nejpoužívanější způsob pro dávkování kapalného a řídkého substrátu.
3. **Kontinuální** – reaktor je stále naplněný, vyprazdňuje se jen příležitostně (opravy, čištění). Čerstvý substrát je několikrát denně dopravován čerpadlem do fermentoru za současného odvodu vyhnílého substrátu do skladovací nádrže.

#### 1.4.2 Základní prvky bioplynové stanice

Jak již bylo řečeno, ve většině bioplynových stanic se setkáme s mokrou fermentací. Tato kapitola je proto zaměřena na popis této technologie.

Bioplynovou stanici jako celek lze rozdělit na čtyři základní stavebně-technologické celky.



Obr. 1-2 Schéma technologie mokré fermentace [7]

##### 1.4.2.1 Příjmový systém

Jedná se o přípravu čerstvého substrátu před jeho dávkováním do fermentorů. Příprava může probíhat v takzvané homogenizační nádrži a spočívá v separaci hrubých příměsí, úpravě velikosti částic, míchání, ředění popř. zahušťování.

##### 1.4.2.2 Fermentační systém

V této části probíhá proces anaerobní fermentace. Nejdůležitější součástí je zde fermentační reaktor (fermentor). Jedná se o uzavřenou plynotěsnou nádobu různých podob a koncepcí. Reaktor má většinou válcovitý tvar, může být nadzemní, podzemní nebo částečně zapuštěn do terénu. Dále mohou být nádrže koncipovány jako horizontální respektive vertikální. Reaktory se také mohou lišit ve způsobech jímání bioplynu, zde můžeme rozlišit dvě základní koncepce a to fermentor s integrovaným plynojemem nebo fermentor a samostatný plynojem. Každá koncepce má své výhody i nevýhody.

Konstrukčním materiálem bývá většinou železobeton, ale může být použita i ocel, plášť reaktoru je zaizolován (minerální vata, polystyren atd.) a pokryt hliníkovými nebo ocelovými plechy popř. dřevem.

Dále je reaktor samozřejmě vybaven odpovídajícím zařízením a technologií. Jedná se o topný a míchací systém, dávkovací zařízení a další zařízení potřebná pro udržení optimálních podmínek.

#### 1.4.2.3 Uskladňovací systém

Materiál, který zbyde po anaerobní fermentaci (digestát) je využíván jako kvalitní organické hnojivo. Musí být vhodně skladován. Fermentační zbytek může být separován na tuhou frakci a kapalnou frakci (fugát). Tuhá frakce může být uskladněna na vhodných plochách tak, aby nedocházelo k vniknutí či ke splachu hnojiva do povrchových vod. Neseparovaný digestát nebo kapalná frakce se uskladňují ve vhodně koncipovaných jímkách. Velikost skladovacího systému je dimenzována tak, aby pojala hnojivo na období 140 až 150 dní. [7]

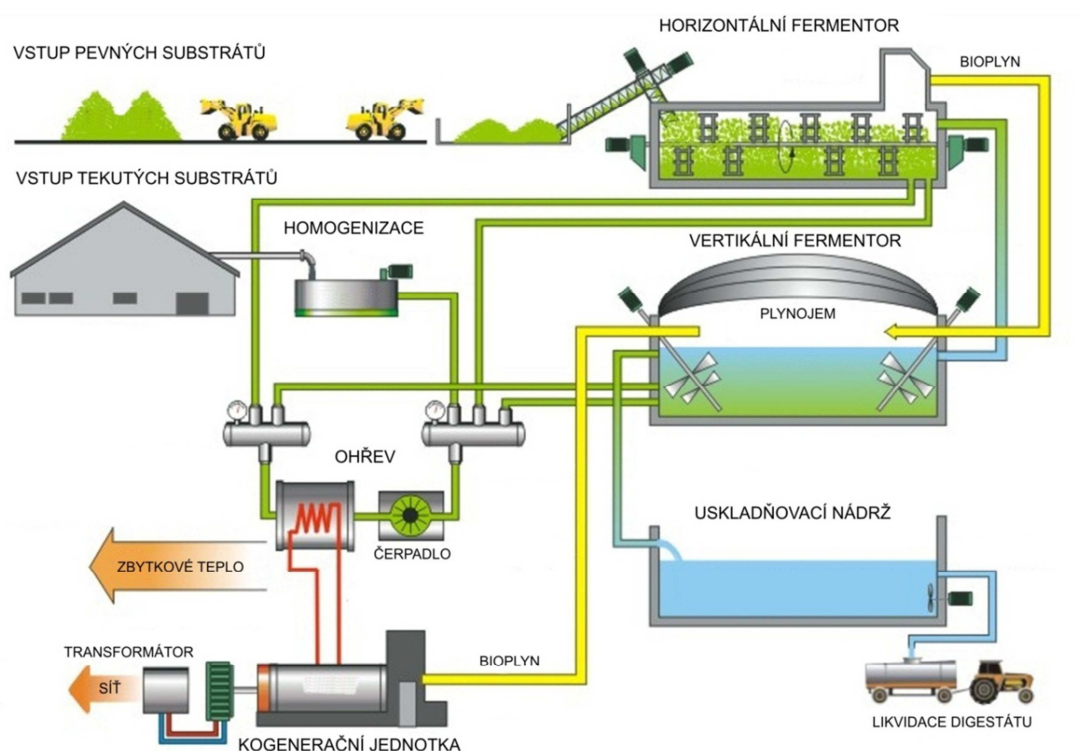
#### 1.4.2.4 Využití bioplynu

Tento technologický celek zahrnuje potrubní systém na dopravu plynu, bezpečnostní zařízení, kompresor, plynjem, regulační a kontrolní prvky, zařízení na úpravu plynu (odvodnění, čištění od sirovodíku, CO<sub>2</sub> a mechanických nečistot) a zařízení na konečné využití bioplynu.

Bioplyn lze využít několika způsoby:

- Výroba tepla v teplovodních, horkovodních popř. parních kotlích
- Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách
- Čištění bioplynu a jeho prodej do plynárenské sítě
- Čištění a využití pro pohon dopravní techniky apod.

Aktuálně se bioplyn nejčastěji používá pro kombinovanou výrobu elektrické energie a tepla v kogeneračních jednotkách na bázi pístového spalovacího motoru. [5][7]



Obr. 1-3 Struktura zemědělské bioplynové stanice [5]

## 2 KOMBINOVANÁ VÝROBA ELEKTRICKÉ ENERGIE A TEPLA

Kombinovaná výroba elektrické energie a tepla (KVET), bývá označována též jako kogenerace, spočívá ve společné výrobě těchto dvou komodit v jediné centrále. V podstatě jde o využití tepla, které vzniká při výrobě elektřiny. V případě oddělené výroby elektrické energie v elektrárně by toto teplo bylo zmařeno a pro výrobu tepla například pro vytápění objektů nebo pro přípravu TUV (teplé užitkové vody) by bylo spáleno další palivo ve výtopnách (zařízení určené pro oddělenou výrobu tepelné energie). Z toho je jasné, že využití tepla přispívá k výraznému zvýšení účinnosti, s tím související úspoře paliva a snížení emisí.

V minulosti byla v ČR využívána hlavně velká kogenerace tzv. teplárenství, což je energetické odvětví, jehož účelem je výroba, dodávka a rozvod tepla. Teplárna je pak samostatný zdroj tepla, které je vyráběno v kombinovaném cyklu s elektřinou a je dodáváno do soustav centralizovaného zásobování teplem.

Ne vždy je však možné využít všechno teplo například u velkých elektrárenských bloků, které jsou většinou stavěny v blízkosti zdroje paliva a naopak dále od osídlených oblastí. Zde by bylo budování teplovodů ke spotřebiteli neekonomické. Vhodným řešením se tak jeví kombinace velkých centrálních zdrojů (nejlépe jaderných nebo moderních uhelných podkritických či nadkritických bloků) s decentrálními vysoce účinnými zdroji kombinované výroby elektřiny a tepla.

Technologie pro kombinovanou výrobu jsou velmi různorodé jak z hlediska fyzikálního principu (spalovací a parní turbíny, pístové motory, palivové články atd.), tak z hlediska velikostního (elektrické výkony největších zařízení se pohybují ve stovkách megawattů, naproti tomu u nejmenších zařízení jde o desítky či jednotky kilowattů). Pro kogeneraci lze také využít téměř všechna dostupná paliva a energetické zdroje (fosilní paliva různých skupenství, biomasa, odpady, jaderná energie, geotermální energie). [8] [9] [10]

### 2.1 Charakteristické ukazatele zdrojů kogenerace

#### 2.1.1 Teplárenský modul

Teplárenský modul je jedním z nejdůležitějších ukazatelů kogeneračních zařízení. Může být označován také pojmem modul teplárenské výroby elektřiny, popřípadě v anglicky psaném textu je používán termín power/heat ratio. Je definován jako podíl výroby elektřiny k výrobě užitečného tepla v zařízeních KVET za určité časové období.

Můžeme ho vyjádřit vztahem:

$$e = \frac{E}{Q_D} \quad [-]$$

Kde:  $e$       teplárenský modul [-]

$E$       elektřina vyrobená v procesu KVET [kJ, kWh]

$Q$       teplo vyrobené v procesu KVET [kJ, kWh]

#### 2.1.2 Účinnosti zdrojů kogenerace

**Účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET** – podíl elektrické energie vyrobené formou KVET a tepla přivedeného palivem

$$\eta_K^e = \frac{E}{Q_{pal}} \quad [-]$$

Kde:  $\eta_K^e$       účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET [-]



$E$  množství elektrické energie vyrobené ve zdroji KVET [kJ, kWh]

$Q_{pal}$  množství tepla přivedeného palivem [kJ, kWh]

**Účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET** – podíl užitečného tepla vyrobeného formou KVET a tepla přivedeného palivem

$$\eta_K^q = \frac{Q_D}{Q_{pal}} \quad [-]$$

Kde:  $\eta_K^q$  účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET [-]

$Q_D$  množství užitečného tepla vyrobeného ve zdroji KVET [kJ, kWh]

$Q_{pal}$  množství tepla přivedeného palivem [kJ, kWh]

**Celková účinnost zdroje KVET** – podíl celkové elektřiny a užitečného tepla vyrobených formou KVET k přivedenému teplu palivem

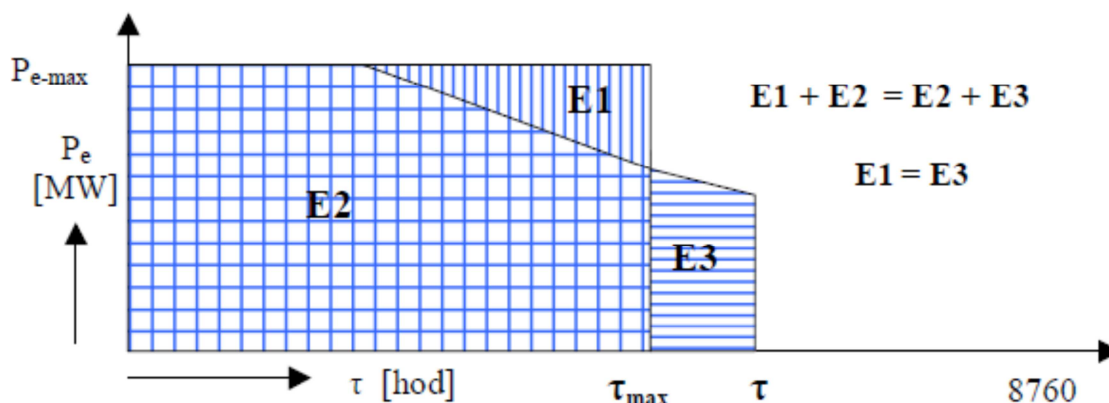
$$\eta_K^{celk} = \frac{E + Q_D}{Q_{pal}} = \eta_K^E + \eta_K^q \quad [-]$$

Kde:  $\eta_K^{celk}$  celková účinnost zdroje KVET [-]

### 2.1.3 Doba provozu a roční doba využití maximálního výkonu

Celková doba provozu kogeneračního zdroje  $\tau$  [h] představuje součet celkového času v průběhu celého roku, kdy byl zdroj v provozu bez rozdílu, zda se jednalo o provoz na částečný výkon nebo na výkon maximální, provoz v jednom časovém úseku nebo provoz přerušovaný apod.

Roční doba využití maximálního výkonu  $\tau_R$  [h] je fiktivní doba, za kterou by bylo při stálém maximálním výkonu vyrobeno stejné množství energie jako při reálném provozu během celého roku. [11]



Obr. 2-1 Znázornění významu doby provozu a doby využití maximálního výkonu [11]

### 2.1.4 Úspora primárního paliva

Většina elektrické energie je u nás vyráběna v kondenzačních elektrárnách (tzn. odděleným způsobem), které pracují s účinností v rozmezí 35 – 42 %. Většina uvolněné energie z paliva je tak bez užítu vypuštěna do atmosféry. Tepelná energie může být vyrobena odděleným způsobem ve výtopnách s účinností v rozmezí 75 – 96 %. Tepelná energie je však méněhodnotná, protože její použití je značně omezené.

Výrobou elektrické energie a tepla kogeneračním způsobem je využita většina energie uvolněné z paliva, kogenerační zařízení tak dosahují účinností 70 – 90 %, a je tak možné ušetřit značnou část primárního paliva, které by bylo třeba pro výrobu stejného množství energií odděleným způsobem.

Úsporu primárního paliva lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\Delta Q^K = Q^E + Q^V - Q^K \quad [\text{GJ}]$$

$$\Delta Q^K = \frac{E}{\eta_{KE}} + \frac{Q_D}{\eta_V} - \frac{E+Q_D}{\eta_K} \quad [\text{GJ}]$$

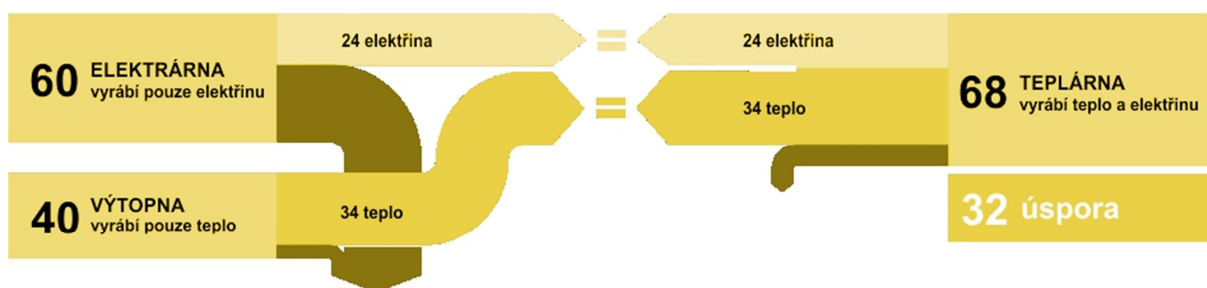
Kde:  $\Delta Q^K$  úspora primárního paliva [GJ]  
 $Q^E$  teplo přivedené palivem do kondenzační elektrárny [GJ]  
 $Q^V$  teplo přivedené palivem do výtopny [GJ]  
 $Q^K$  teplo přivedené palivem do kogeneračního zdroje [GJ]  
 $E$  množství elektrické energie [GJ]  
 $Q_D$  množství užitečného tepla [GJ]  
 $\eta_{KE}$  účinnost kondenzační elektrárny [-]  
 $\eta_V$  účinnost výtopny [-]  
 $\eta_K$  účinnost kogeneračního zdroje [-]

Při zavedení teplárenského modulu lze vztah upravit do tvaru:

$$\Delta Q^T = Q_D \cdot \left[ \frac{e \cdot \eta_V + \eta_{KE}}{\eta_{KE} \cdot \eta_V} - \frac{e+1}{\eta_K} \right]$$

Z uvedených vztahů je jasné, že při hodnotách  $\Delta Q^T$  větších než nula nastává úspora paliva. Ne vždy to však musí platit a můžeme se dostat i do záporných hodnot. Zejména pokud jsou srovnávána zařízení s vysokou účinností (elektrárnské bloky s nadkritickými parametry páry, moderní výtopny) a naopak kogenerační zařízení s nižší účinností, kde dochází například k velkým tepelným ztrátám. V takových případech pak kogenerace ztrácí svůj smysl.

Z následujícího obrázku je patrné, že pro výrobu stejného množství elektrické energie a tepla kogeneračním způsobem je možné ušetřit až jednu třetinu primárního paliva oproti oddělené výrobě.



Obr. 2-2 Úspora primárního paliva při kombinované výrobě elektrické energie a tepla [10]

## 2.2 Druhy kogeneračních technologií

Intenzivní vývoj v oblasti energetiky a zejména v oblasti kogenerace nám umožňuje využívat širokou paletu vhodných kogeneračních zařízení, jež jsou realizována přesně podle požadavků odběratelů energií s ohledem na primární energetické zdroje.

Každý kogenerační zdroj se skládá ze čtyř základních částí:

- Pohonná jednotka
- Elektrický generátor a zařízení pro připojení k rozvodné síti
- Kotel, popřípadě tepelný výměník a zařízení pro připojení k síti zásobování teplem



- Kontrolní a řídicí systém

Využívané pohonné jednotky v kogeneračních zdrojích:

- Parní turbíny
- Plynové turbíny
- Spalovací pístové motory
- Stirlingovy motory
- Zařízení využívající ORC cyklus
- Parní motory

### 2.2.1 Parní turbíny

Parní turbína je tepelný stroj, jehož pracovním médiem bývá většinou vodní pára. Pára, která prochází turbínou, postupně expanduje, její teplota a tlak klesají a část energie páry je tak předávána rotoru turbíny a transformována na energii mechanickou. Hřídel rotoru turbíny je buď přímo přes pevnou spojku, nebo přes převodovku spojena s elektrickým generátorem, kde je mechanická energie přeměněna na energii elektrickou.

Výhodou parních turbín je to, že se jedná o tepelný stroj bez vnitřního spalování, to znamená, že teplo je do oběhu přivedeno přes tepelný výměník respektive kotel. Nejsme tak omezeni výběrem paliva (fosilní paliva, biomasa, odpady atd.). Výkony parních turbín se pohybují v širokém rozsahu od stovek kW až po stovky MW.

S parními turbínami se setkáme zejména v teplárnách, tzn. ve velkých kogeneračních zdrojích, které jsou napojeny na rozsáhlé sítě CZT a jejichž tepelné výkony jsou jednotky až stovky MW a tomu odpovídající elektrické výkony. [11] [13]

Teplárenské parní turbíny mívají dvě základní konstrukce:

#### Protitlaková parní turbína

Je turbína, u níž je expanze na posledním stupni ukončena při tlaku větším než atmosférickém (0,1 MPa) a teplota na výstupu je tak vyšší než 100 °C. Za touto turbínou obvykle následuje parovod rozvádějící páru pro vytápění popř. pro technologické účely, nebo kondenzátor s tlakem vyšším než 0,1 MPa. Velkou nevýhodou takto samostatně pracující turbíny je závislost výroby elektrické energie na dodávkách tepla. Při ukončení dodávek tepla je nutné odstavit i turbínu.

#### Parní turbína s regulovanými odběry

Páru je možné z turbíny v určitém místě mezi stupni (tam, kde jsou požadované parametry páry) odebírat a dále ji opět využít pro různé technologie nebo vytápění. Odebírané množství bývá dle potřeby regulováno regulačním ventilem v rozsahu od nuly až po maximální množství, na které byl tento odběr konstruován. Při nulovém odběru páry přechází turbína do kondenzačního režimu, kdy je veškerá přivedená pára využita na výrobu elektrické energie. Výhodou tohoto stroje je možnost výroby elektrické energie, která není zcela závislá na dodávce tepla. Turbína většinou obsahuje i jiné odběry, jedná se však zpravidla o neregulované odběry páry, které slouží pro regenerační ohřev napájecí vody.

### 2.2.2 Plynové turbíny

Plynová turbína je tepelný točivý stroj, který pracuje podobně jako parní turbína, ale jeho pracovní tekutinou není vodní pára ale plyn (např. směs vzduchu a spalín použitého paliva). Plynová turbína se skládá ze tří základních částí. První částí je turbokompresor, který stlačuje nasávaný vzduch s kompresním poměrem obvykle v rozmezí 10 – 20, následuje spalovací komora, kde se stlačený vzduch mísí s plynným popřípadě kapalným palivem (zemní plyn, topné oleje apod.). Teplota směsi je v důsledku hoření zvýšena až na 1300 °C, s čímž naroste i její tlak. Směs je dále přivedena na axiální turbínu, kde v několika stupních

expanduje a její energie je tak převedena na energii mechanickou. Část této energie je využita pro pohon kompresoru, přebytečná energie je v elektrickém generátoru transformována na energii elektrickou.

V praxi se můžeme setkat se dvěma typy plynových turbín. Prvním typem je turbína průmyslového typu, která je určena pro energetické účely, zpravidla mívá robustnější konstrukci. Druhým typem je turbína, která je odvozena od proudového leteckého motoru, který může být po určitých úpravách využíván ve stacionárním provedení pro energetické účely. Tyto turbíny se označují jako aeroderiváty.

Spaliny, které vychází z turbíny, mají ještě dostatečnou teplotu (obvykle kolem 500 °C). Buď jsou využity přímo pro určité technologie. Většinou jsou však zavedeny do takzvaného spalínového kotle, kde je v teplosměnných plochách vyráběna teplá voda, horká voda popř. pára a tyto jsou pak využívány pro vytopenské účely.

Plynovou turbínu je možné vhodně kombinovat s parní turbínou, kdy pára o vysokém tlaku je vyráběna právě ve spalínovém parním kotli za plynovou turbínou. Teplo pro vytápění je možné získávat odběrem z parní turbíny nebo ohřevem ve spalínovém kotli. Takovéto zařízení se označuje jako teplárna s paroplynovým cyklem (PPC).

K dosažení nezávislosti mezi chodem plynové turbíny a odběrem tepla popř. oběhem parní turbíny, bývá často u těchto zařízení instalován mezi plynovou turbínou a spalínovým kotlem tzv. by-passový komín s klapkou, který umožní odvod nedochlazených spalin přímo do atmosféry.

Plynová turbína, vzhledem k možnosti relativně rychlého najíždění případně odstavení, je vhodným zařízením pro poskytování systémových služeb elektrizační soustavě.

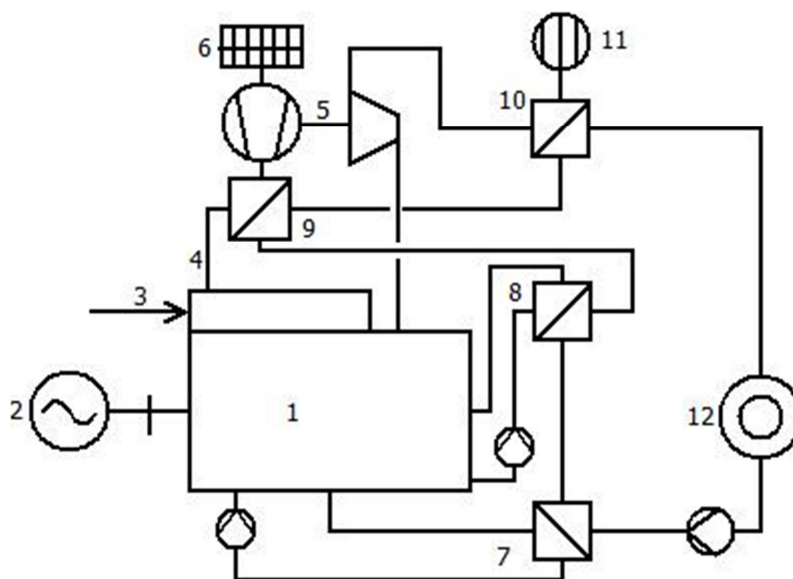
### 2.2.3 Spalovací pístové motory

Jedná se o tepelný objemový stroj s vnitřním spalováním, který je velmi vhodný pro využití ve zdroji KVET. Spalovací pístový motor pracuje v opakovaném cyklu, kdy nasátý vzduch je ve válci stlačen, po vstřiku a zažehnutí (vznícení) paliva směs v uzavřeném prostoru zvýší svůj tlak a při následné expanzi silově působí na pohyblivou stěnu (píst) čímž je její energie transformována na mechanickou práci. Ve své podstatě se jedná o stejný motor, který slouží k pohonu automobilů a jiných dopravních prostředků s tím rozdílem, že mechanická práce na klikové hřídeli je použita pro pohon elektrického generátoru a odpadní teplo, které vzniká chlazením bloku motoru, chlazením mazacího oleje a teplo na výfuku motoru je využito např. pro vytápění.

Pro zdroje KVET se spalovacími motory se vžilo označení kogenerační jednotky. Na rozdíl od klasických spalovacích motorů jsou na ně kladeny určité nároky. Kogenerační jednotky jsou konstruovány pro spalování specifického druhu paliva, obvykle levnějšího než benzín či nafta. Bývají to zejména plynná paliva (zemní plyn, čistírenské plyny, skládkové plyny, bioplyny atd.) nebo kapalná paliva (topné oleje, bionafta, odpadní tuky apod.). Dalšími požadavky na kogenerační jednotku jsou dlouhá doba životnosti, provozní spolehlivost a schopnost dlouhodobého provozu bez odstávek. Tyto stroje jsou tak konstruovány jako nízkootáčkové s poměrně masivní konstrukcí.

Nejčastějším využitím odpadního tepla je ohřev topné vody na teplotu kolem 90 °C, která je dále využita např. pro vytápění. Voda je postupně ohřívána v soustavě výměníků, které chladí mazací olej, chladicí vodu bloku motoru a hlavy válců, u přepínaných motorů může být zařazen výměník pro chlazení stlačeného vzduchu, v posledním stupni je zařazen výměník spaliny/voda pro dochlazení spalin. Jelikož spaliny na výfuku mají ještě teplotu kolem 500 °C, je možné v určité míře produkovat i páru, která by mohla pohánět například pístový parní motor spojený s generátorem, v takovém případě mluvíme o pístovém paroplynovém cyklu.

Kogenerační jednotky jsou vyráběny v poměrně širokém výkonovém rozsahu od desítek kW až po několik MW elektrického výkonu. [11] [12]



Obr. 2-3 Schéma kogenerační jednotky

1 spalovací pístový motor, 2 elektrický generátor, 3 přívod paliva, 4 přívod vzduchu, 5 turbodmychadlo, 6 sání vzduchu, 7 chladicí okruh oleje, 8 chlazení motoru, 9 chlazení stlačeného vzduchu, 10 chlazení spalin, 11 výfuk, 12 spotřebitel tepla

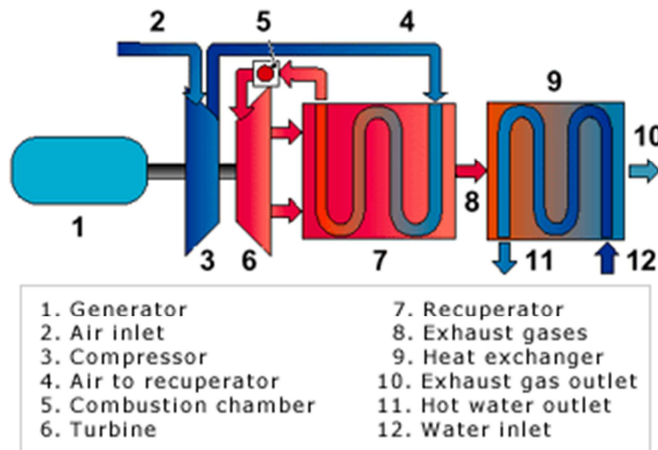
## 2.2.4 Ostatní technologie

### 2.2.4.1 Mikroturbína

Mikroturbíny jsou spalovací turbíny malých výkonů (25 – 250 kW). Ve zdroji KVET je toto zařízení vybaveno tepelným výměníkem, který využívá teplo spalin pro ohřev topné vody nebo výrobu páry. Mikroturbína se skládá většinou z jednostupňového radiálního kompresoru, spalovací komory a jednostupňové radiální turbíny, která je na společné hřídeli s kompresorem. Rekuperátor slouží k předehřevu spalovacího vzduchu.

Tyto stroje jsou vysokootáčkové, nelze zde použít mechanickou převodovku, proto se zde používá vysokofrekvenční generátor a frekvenční měnič.

Mikroturbíny bývají konstruovány zejména pro spalování zemního plynu, ale mohou pracovat i s jinými vysoce výhřevnými čistými palivy (benzín, nafta). Tlak plynu v rozvodné síti je většinou nedostatečný, proto je nutné jej do spalovací komory stlačovat (součástí je i plynový kompresor), to negativně ovlivňuje účinnost stroje.



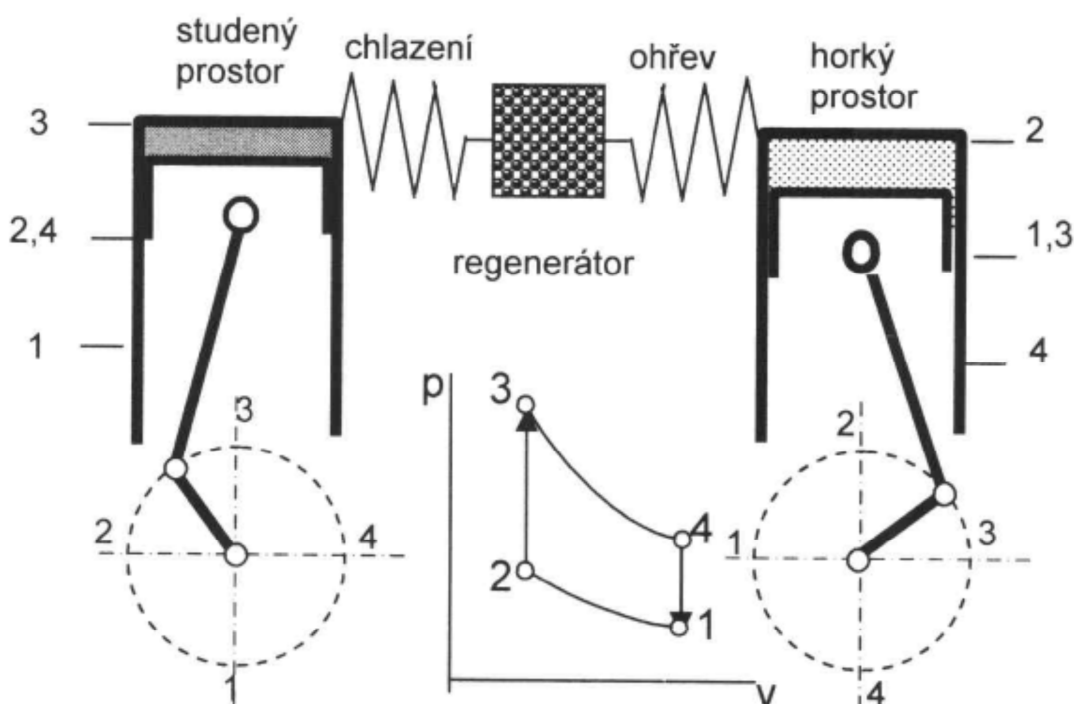
Obr. 2-4 Princip funkce mikroturbíny [14]

### 2.2.4.2 Stirlingův motor

Jedná se o druh tepelného pístového motoru s vnějším spalováním. Tento motor má mnoho modifikací, ale je typický tím, že má trvale vzájemně propojeny dvě pracovní komory s rozdílnou teplotou – horkou a studenou. V tomto pracovním prostoru motoru je uzavřeno stálé množství pracovního plynu (nejčastěji vzduch, dnes spíše helium, dusík), tento plyn se během práce motoru nevyměňuje, pouze se přemísťuje z jednoho válce do druhého.

Oběh stirlingova motoru je možno nahradit posloupností ideálních dějů: izotermická komprese, izochorická komprese, izotermická expanze a izochorická expanze. Při tomto oběhu je pracovní látce teplo přiváděno v ohřívači (větší množství) a odváděno v chladiči (menší množství), jejich rozdíl je tak odváděn z motoru formou mechanické práce na hřídeli.

Pro zvýšení účinnosti oběhu se používá mezi komorami regenerátor, který zvýší rozdíl mezi teplotami přívodu a odvodu tepla. [12]



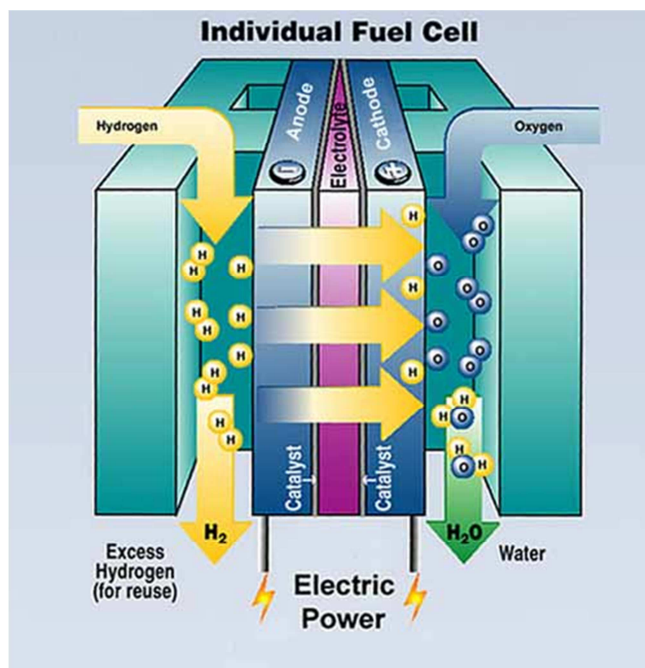
Obr. 2-5 Princip práce stirlingova motoru [12]

### 2.2.4.3 Palivový článek

Palivový článek je zařízení, které produkuje elektrickou energii přímou konverzí chemické energie paliva na energii elektrickou a tepelnou. Zdrojem energie je nejčastěji vodík, který spolu se vzdušným kyslíkem může exotermním procesem vyrábět elektrickou energii prostřednictvím elektrolytu za vzniku vody nebo vodní páry.

Na porézní anodě pokryté vrstvou katalyzátoru dochází ke štěpení vodíku na protony a elektrony. Protony procházejí elektrolytem ke katodě rovněž pokryté katalyzátorem a reagují tam s adsorbovanými kyslíkovými atomy na vodní páru, zatímco elektrony protékají elektricky vodivou anodou a uzavřeným okruhem jako elektrický proud.

Podle pracovní teploty a podle druhu elektrolytu je možné palivové články rozdělit do několika skupin. Nejrozvinutějším typem je článek s kyselinou fosforečnou jako elektrolytem zkráceně označován jako PAFC. Jeho pracovní teplota je přibližně kolem 200 °C.



Obr. 2-6 Princip palivového článku [15]

### 2.3 Podmínky uplatnění kogeneračního zdroje

Jednou z nejdůležitějších podmínek pro uplatnění zdroje kombinované výroby elektřiny a tepla je existence spotřebitele tepla, tak aby byl zajištěn dostatečný odbyt a to v ekonomicky výhodné vzdálenosti od místa lokalizace zdroje. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, ztrácí kogenerace svůj původní smysl a budování takového zdroje by nebylo efektivní.

Elektrizační soustava se z pohledu zdroje KVET jeví jako globální systém, což znamená, že je schopna pojmout celoročně prakticky libovolný elektrický výkon zdroje. Oproti tomu tepelná soustava ať už se jedná o vytápění objektů, dodávky tepla do sítě CZT nebo jiného tepelného odběru, bude mít vždy lokální charakter, což znamená, že bude schopna pojmout pouze omezený tepelný výkon a to navíc značně rozdílný v zimním a letním období.

Velikost a charakter odběru tepla by tak měl být jedním z hlavních určujících faktorů pro volbu typu a výkonu příslušné technologie KVET. [11]

Ale například bioplynové stanice, na které je tato práce zaměřena, bývají obvykle dimenzovány na trvalý provoz s výkonem odpovídajícím výrobě bioplynu. V jiných případech pak může být kogenerační zdroj dimenzován na pokrytí vlastní spotřeby elektrické energie. U takovýchto aplikací se můžeme setkat s velkými přebytky odpadního tepla, které není efektivně využito.

Pohonná jednotka	Používané palivo	Rozsah výkonů [MWe]	Modul teploty výroby elektřiny	Elektrická účinnost [%]	Celková účinnost [%]	Forma tepla
Odběrová parní turbína	Libovolné	5 – 300	0,2 – 0,4*)	10 – 30	78 – 88	NT pára horká voda
Protitlaková parní turbína	Libovolné	0,1 – 100	0,1 – 0,4	7 – 20	75 – 88	NT pára horká voda
Spalovací turbína	Zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplyňování	1**) – 250	0,4 – 1,2	25 – 48	75 – 90	Teplá voda horká voda pára NT, VT
Paroplynové zařízení	Zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplyňování	10 – 400	0,8 – 2,0	35 – 60	85 – 90	Teplá voda horká voda pára NT, VT
Spalovací motor	Zemní plyn, LTO, bioplyn, produkty zplyňování	0,01 – 10	0,5 – 1,1	25 – 45	75 – 92	Teplá voda horká voda pára NT
Parní motor	biopaliva	0,02 – 1	0,1 – 0,3	10 – 25	70 – 80	Teplá voda
Stirlingův motor	Zemní plyn, biopalivo	0,001 – 0,03	0,3 – 0,7	20 – 40	70 – 85	Teplá voda
*) Vztaženo jen na odběrovou páru						
**) U mikroturbín 25 – 250 kW						

Tab. 2-1 Charakteristické vlastnosti základních kogeneračních technologií [12]

### 3 MOŽNOSTI VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA NA BPS

Ve většině bioplynových stanicích je vzniklý bioplyn využíván přímo v místě svého vzniku, a to spalováním převážně v kogeneračních jednotkách se spalovacími pístovými motory. Teplárenský modul těchto jednotek se pohybuje přibližně v rozmezí 0,5 – 0,9, z čehož je zřejmé, že k danému elektrickému výkonu vzniká poměrně velké množství tepla, které je nutné rozumným způsobem využít, aby byla dodržena základní myšlenka kogenerace. Produkce tepla však bývá tak vysoká, že provozovatel není schopen veškeré teplo využít a to odchází bez užitku se spalinami, nebo je mařeno v tepelných výměnících. Dochází tak i ke značným ekonomickým ztrátám.

Technologie bioplynových stanic spotřebuje určitou část produkovaného tepla pro technologické ohřevy a vytápění fermentačních reaktorů. Podíl takto využitého tepla se pohybuje řádově v rozpětí 15 – 45 % v závislosti na použité technologii a také na okolní teplotě (roční období). I přes to je stále značný přebytek tepla, jehož využití je třeba věnovat pozornost. Nabízí se řada možností, konkrétní technické řešení je však značně závislé na místních podmínkách. Běžným způsobem, jak teplo využít, je vytápění a ohřev TUV v areálu BPS, popřípadě v přilehlých obcích nebo podnicích. To s sebou však přináší značné investice do vybudování a údržby teplovodních sítí a další problém je ten, že není zaručen celoroční odběr tepla, pouze sezónní. Je tak potřeba zvážit vybudování další doprovodné technologie, která by zaručila, popřípadě zrovnoměnila odběr tepla v letních a zimních měsících. Těmito technologiemi jsou např. sušárenské technologie (sušení zemědělských komodit, sušení řeziva, štěpky apod.), absorpční chlazení (např. klimatizace, chladicí boxy pro skladování potravin), vytápěné skleníky, stanice pro chov teplomilných živočichů atd. [16]

#### 3.1 Teplovzdušné sušení

Jednou z možností pro využití odpadního tepla z kogenerační jednotky přímo v zemědělském podniku je dosoušení obilí, řepky, kukuřice a jiných produktů rostlinné výroby. Sušení probíhá ve speciálních zařízeních – sušárnách pomocí teplého vzduchu, který je ohříván v tepelném výměníku voda/vzduch chladící vodou z kogenerační jednotky. Pokud je tak nahrazeno stávající zařízení, jsou také uspořeny náklady na fosilní paliva, kterými jsou běžně sušičky vytápěny.

Další možností, jak teplo zužitkovat je sušení digestátu (zbytek po anaerobní fermentaci). K tomu se používají teplovzdušné pásové sušárny. Usušený digestát je možné peletovat a používat jako hnojivo. Podobným způsobem lze sušit například dřevní štěpky a jiné podobné materiály.

Odpadní teplo je také možné použít pro vytápění sušáren řeziva. Sušárna řeziva je speciální komora, která je vybavena výměníkem voda/vzduch, soustavou ventilátorů pro cirkulaci sušícího vzduchu, odvětrávacími ventilátory, klapkami pro přívod a odvod vzduchu, popřípadě rozprašovacími vodními tryskami (pro udržení požadované vlhkosti).



Obr. 3-1 Komorová sušárna řeziva [17]



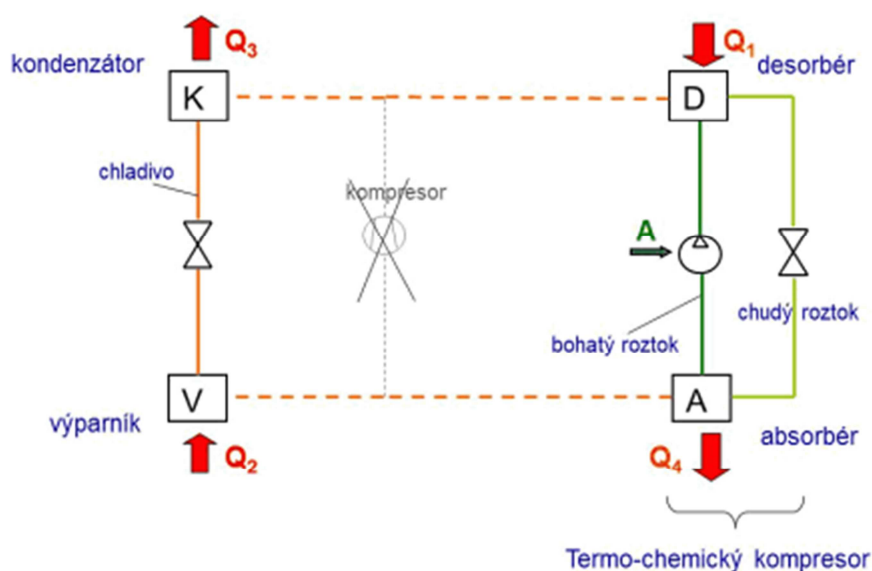
## 3.2 Absorpční chlazení

Chlazení funguje na principu tepelného čerpadla, kdy teplo je odebráno z chladnějšího prostředí a je odevzdáváno do teplejšího prostředí. Tento přenos je proti přirozenému toku tepla, a proto je nutné k jeho realizaci vynaložit určitou energii – u kompresorových chladniček ve formě mechanické práce, u absorpčního chlazení ve formě tepla. [24]

Absorpční chlazení se tak nabízí jako vhodná technologie pro využití odpadního tepla například z kogeneračních jednotek. Důležitou podmínkou při produkci chladu je, aby byl zajištěn jeho odběr. S potřebou chladu se setkáváme v řadě oborů – skladování a úprava potravin, zajištění provozu sportovišť s ledovou plochou, zajištění pohody prostředí v budovách – klimatizace a jiné technologie.

S ohledem na umístění většiny bioplynových stanic ve stávajících zemědělských areálech mimo zastavěných a průmyslových oblastí, kde by produkce chladu mohla být využita, je spojení BPS a produkce chladu značně omezené. Ale záleží na daných podmínkách a možnostech, jednou z oblastí využití by mohlo být například chlazení mléka.

### 3.2.1 Princip absorpčního chlazení



Obr. 3-2 Schéma absorpčního chladičského oběhu [25]

Na obrázku 3-2 vidíme schéma absorpčního oběhu. Páry chladiva, které po odpaření ve výparníku odcházejí do absorberu, jsou absorbovány do kapalné látky, současně se uvolňuje teplo  $Q_4$ , vzniklá kapalná směs je přes čerpadlo dopravena do desorbéru, za zvýšeného pracovního tlaku zde dochází vlivem přívodu tepla  $Q_1$  (hnací energie oběhu) k vypuzení chladiva z absorpční kapaliny ve formě par. Páry dále vstupují do kondenzátoru, kde kondenzují, dále chladivo přes škrtkový ventil vstupuje do výparníku, kde vlivem snížení tlaku dochází k varu chladiva při nízké teplotě, což způsobuje odnímání tepla z ochlazovaného prostoru, případně ochlazované látky. Tímto je oběh uzavřen. Oddělenou větví se z vysokotlaké části oběhu (z desorbéru) vrací přes škrtkový ventil do nízkotlaké části (do absorberu) absorpční kapalina prostá vypuzeného chladiva. [25]

Nejčastěji používané dvojice látek:

- **Čpavek – voda** – čpavek jako chladivo, voda jako absorbent, chlazení pro nadnulové i podnulové teploty.
- **Voda – lithiumbromid** – voda jako chladivo, lithiumbromid jako absorbent, chlazení pouze pro nadnulové teploty, ale ekologická nezávadnost látek a další výhody.



### 3.3 Zvýšení podílu výroby elektrické energie

Jednou z možností jak využít odpadní teplo na PBS je zařazení vhodné technologie, která dále odpadní teplo transformuje na elektrickou energii a zvýší tak elektrickou účinnost zdroje. Takovouto technologií je například ORC cyklus (organický Rankin – Clausiův cyklus) nebo zařazení pístového parního motoru, v tomto případě pak hovoříme o pístovém paroplynovém cyklu.

#### 3.3.1 Parní motor

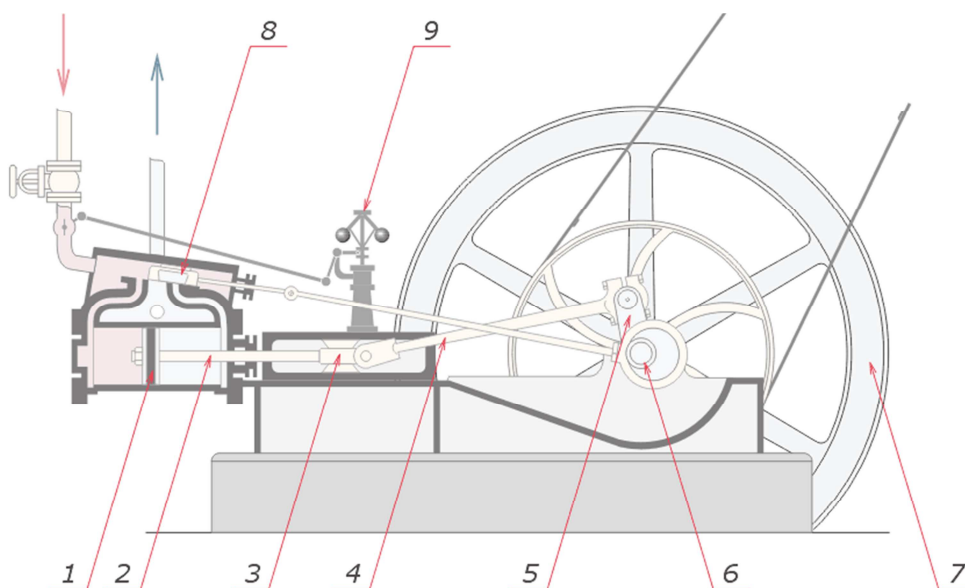
Jedná se o tepelný pístový stroj s vnějším přívodem tepla (vnějším spalováním). Parní motor je součástí parního oběhu, do něhož je teplo přiváděno v parním kotli nebo v parogenerátoru a odváděno v kondenzátoru nebo expanzí páry do okolí. Práce, kterou pára vykoná je pak z motoru odvedena na hřídeli, která v dnešních aplikacích pohání většinou elektrický generátor.

Parní stroj jako takový je znám již od 18. Století, kdy byl používán zejména v průmyslu pro pohon mechanických zařízení a v dopravě pro pohon lodí, lokomotiv a jiné techniky. Postupným vývojem byly však parní stroje nahrazovány parními turbínami, schopnými zpracovávat mnohem větší tlakové spády a hmotnostní průtoky. V dopravě byly pak parní stroje nahrazeny pístovými spalovacími motory popřípadě elektromotory.

Dnes se ovšem s parním motorem můžeme opět setkat v různých aplikacích. Parní motory malých výkonů (řádově stovky kW), při použití moderních technologií a materiálů, mohou dosáhnout větší vnitřní termodynamické účinnosti než parní turbíny stejných výkonů. Výhodou parního motoru je také to, že je schopen zpracovat menší množství páry při větším tlakovém spádu. Pro provoz parního motoru také postačuje sytá pára a není tak citlivý na čistotu páry. Investiční náklady na realizaci parního oběhu s parním motorem budou pravděpodobně také nižší než na realizaci oběhu s parní turbínou.

Parní motor může být využit jako točivá redukce tlaku páry pro technologické účely, jako samostatný oběh, popřípadě pro využití odpadního tepla z různých technologií.

##### 3.3.1.1 Konstrukce



Obr. 3-3 Schématický popis parního motoru [18]

(1) píst, (2) pístní tyč, (3) křížák, (4) ojnice, (5) klika, (6) excentrický mechanismus – slouží pro pohon šoupátka, (7) setrvačnický hřídel – zajišťuje rovnovážné otáčení klikového hřídele, (8) šoupátko, (9) Wattův odstředivý regulátor – slouží pro regulaci přiváděné páry.

Na obrázku 3-3 můžeme vidět schématické znázornění parního stroje spíše historického provedení, princip činnosti moderního parního motoru je však stejný.

Červenou šipkou je znázorněn přívod páry z parního kotle (popřípadě parního generátoru) do parního rozvodu, odkud je pára řízeně přiváděna do pracovního prostoru válce. Na obrázku vidíme dvojčinný parní stroj (pracovní prostor je před i za pístem). Střídavé otevírání a uzavírání kanálků pro přívod a odvod páry zajišťuje šoupátko, odvod páry je znázorněn modrou šipkou. Tlak páry, která je do válce přivedena, vyvolává sílu působící na píst, tato síla je dále přenášena přes pístní tyč a ojnici na klikovou hřídel, která pohání např. elektrický generátor.



Obr. 3-4 Moderní parní motor, výrobce PolyComp, a.s. [20]

### 3.3.1.2 Rozdělení parních motorů

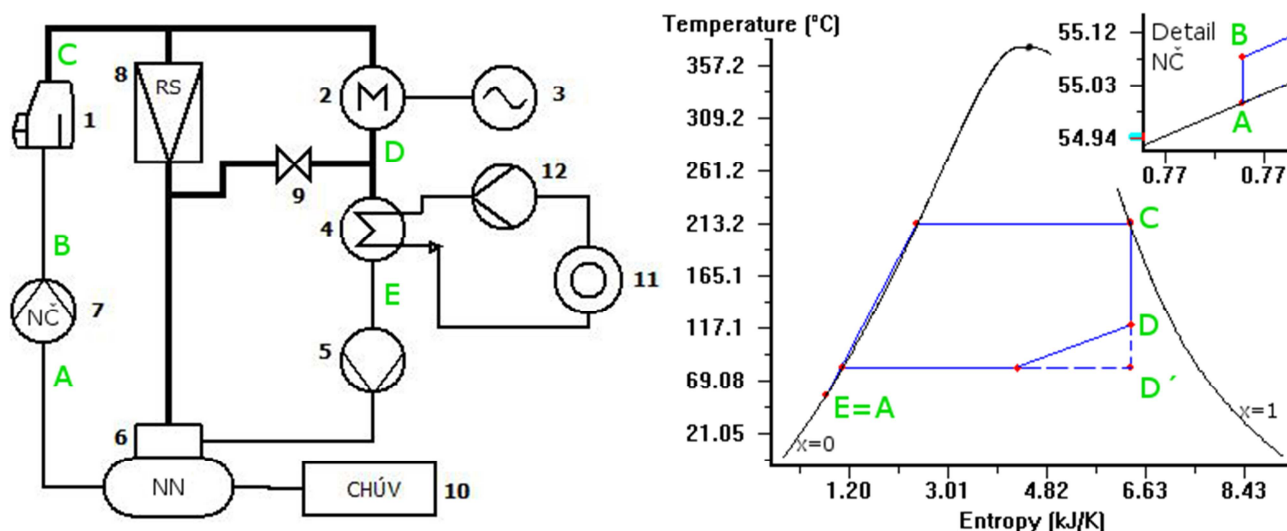
Parní motory je možné členit podle mnoha hledisek. Různé druhy konstrukce jsou více či méně vhodné pro daný účel, velikost výkonu stroje atp.

- a) Podle polohy válců
  - Ležaté – válec stroje je orientován horizontálně, tato konstrukce se hodí spíše pro velké výkony
  - Stojaté – válec je orientován vertikálně, většina dnešních aplikací – menší výkony
- b) Podle parního rozvodu
  - Pístové šoupátko
  - Ventilový rozvod – možnost lepšího seřízení než u šoupátka – vyšší účinnost ale vyšší pořizovací náklady
- c) Podle počtu válců
  - Jednoválcové
  - Víceválcové – buď pro zpracování většího množství páry, nebo pro několikanásobnou expanzi ve více válcích při vyšším tlaku admisní páry
- d) Podle počtu expanzí během jedné otáčky
  - Jednočinné – pára expanduje pouze na jedné straně pístu

- Dvojčinné – pára expanduje na obou stranách pístu, během jedné otáčky proběhnou dvě expanze, zvýšení účinnosti a zmenšení rozměrů stroje
- e) Podle tlaku na výfuku páry
- Výfukové – pára je vyfukována do barometrického tlaku – do atmosféry
  - Kondenzační – pára je vyfukována do kondenzátoru, kde může být nižší tlak než barometrický – zvýšení účinnosti, možnost uzavření oběhu – cirkulace média.

### 3.3.1.3 Termodynamika parního motoru

#### Uzavřený tepelný oběh s pístovým parním motorem



Obr. 3-5 Schéma tepelného oběhu s parním motorem a T-s diagram oběhu

Na obrázku 3-5 vidíme schéma uzavřeného tepelného oběhu s pístovým parním motorem a znázornění tohoto oběhu v T-s diagramu vody a vodní páry.

Čísly 1 – 12 jsou označeny jednotlivé členy oběhu.

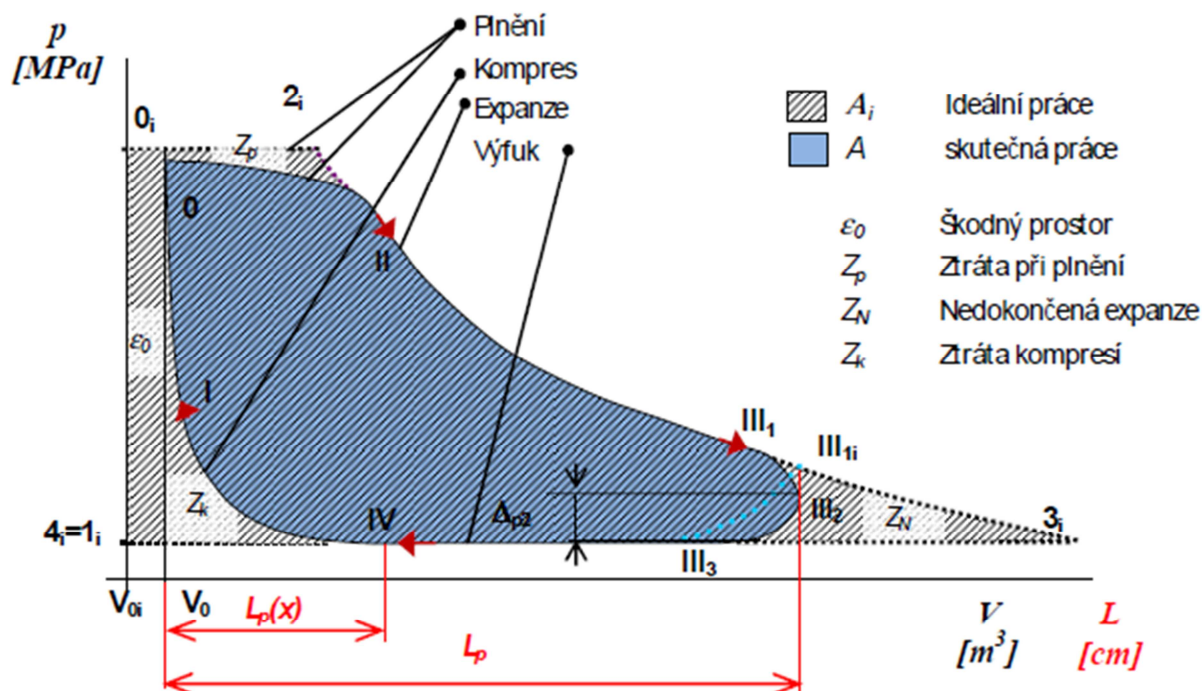
(1) parní kotel (parní generátor), (2) parní motor, (3) elektrický generátor, (4) kondenzátor, (5) kondenzátní čerpadlo, (6) napájecí nádrž, (7) napájecí čerpadlo, (8) redukční stanice, (9) uzavírací armatura, (10) chemická úprava vody, (11) spotřebič tepla, (12) oběhové čerpadlo.

Písmeny A – E jsou označeny stavy pracovní látky v místě označení.

Pracovní látka vstupuje do napájecího čerpadla (bod A), v čerpadle je její tlak zvýšen na požadovanou hodnotu (bod B). Zvýšení tlaku v napájecím čerpadle je detailně zobrazeno v pravém horním rohu. Pracovní látka dále vstupuje do parního kotle a je ohřívána na stav sytosti, za konstantní teploty je odpařována a vzniká sytá pára (bod C). Sytá pára vstupuje do parního motoru, kde expanduje. U ideálního stroje by expandovala do bodu D', u reálných strojů je však ukončena dříve (bod D) z důvodu menších rozměrů válce. Mokrý pára, která z válce pokračuje do kondenzátoru, zkondenzuje, dostáváme se do bodu E, kde je stav pracovní látky totožný s bodem A a oběh se opakuje.

#### p-V diagram parního motoru

Děj probíhající ve válci parního motoru je možné dobře znázornit v tzv. p-V diagramu. Tento diagram vyjadřuje závislost tlaku ve válci stroje na změně objemu ve válci respektive na poloze pístu.



**Obr. 3-6** Ideální a reálný p-V diagram parního motoru [21]

Na obrázku 3-6 je zobrazen p-V diagram parního motoru. Čárkovanou čarou jsou vyznačeny děje, které probíhají u ideálního stroje tj. beze ztrát. Cyklus začíná v bodě  $1_i$ , píst je v horní úvrati a ve válci je tak nulové množství páry. Mezi body  $1_i$  a  $2_i$  probíhá plnění, je to děj, při němž je válec naplněn požadovaným množstvím páry a tento děj je izobarický. V bodě  $2_i$  je přívod páry uzavřen. Následuje polytropická expanze, kdy pára koná práci. Expanduje mezi body  $2_i$  a  $3_i$ , v bodě  $3_i$  je expanze ukončena dosažením tlaku jaký je v kondenzátoru (popř. v atmosféře u výfukových strojů) a otevřením výfukového ventilu (výfukového kanálku). Mezi body  $3_i$  a  $4_i$  probíhá výfuk, tento děj je opět izobarický, dostáváme se do bodu  $4_i$ , cyklus se tak uzavírá a opakuje se.

Chod skutečného stroje je doprovázen různými ztrátami. To je zřejmé z obrázku, kdy plnou čarou, která ohraničuje modrou oblast, jsou vyznačeny děje, které probíhají ve válci skutečného stroje.

Projevují se zde významně čtyři nejdůležitější ztráty:

- **Ztráta škodným prostorem** – škodný prostor je objem, který zůstává ve válci a v rozvodech páry, i když je píst v horní úvrti, tento objem není možné použít k získání práce. Ve válci se tento prostor nechává záměrně, aby nemohlo dojít ke kontaktu pístu se stěnami válce.
- **Tlaková ztráta v parovodu a ztráta škrcením v rozvodech** – tyto ztráty jsou ovlivněny zejména drsností stěn potrubí, délkou potrubí, rychlostí páry, plnění již není jako v ideálním případě izobarické, ale vlivem ztrát izoentaltické.
- **Ztráta nedokončenou expanzí** – u ideálního stroje by expanze pozvolna pokračovala až do bodu 3<sub>i</sub>, u skutečného stroje ji však ukončujeme dříve, prodlužování expanze by vedlo k zvětšování rozměrů válce ale jen k malému nárůstu výkonu. Konec expanze je dán dosažením požadovaného tlaku na výstupu (u protitlakových strojů), nebo dosažením požadovaného výkonu.
- **Ztráta kompresí** – výstup páry z válce je ukončen ještě před dosažením horní úvrti pístu, zbylé množství páry, které ve válci zůstane se tak komprimuje, výkon stroje je snížen o práci potřebnou ke kompresi. [21]



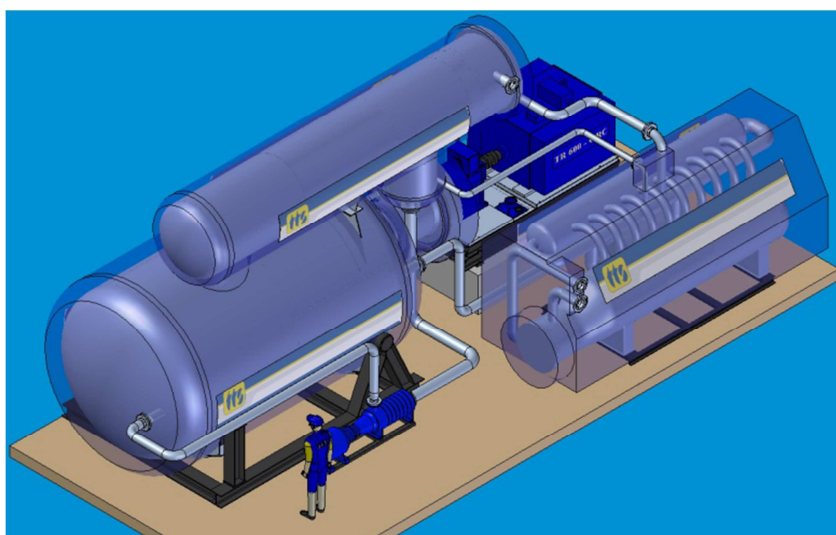
### 3.3.2 ORC cyklus

Klasické tepelné elektrárny využívají k transformaci tepelné energie na mechanickou a následně elektrickou energii tepelný oběh, známý jako Rankin - Clausiův cyklus. Pracovní látkou tohoto oběhu je voda resp. vodní pára.

Organický Rankin – Clausiův cyklus (ORC cyklus) je založen na stejném principu jako RC cyklus s tím rozdílem, že jako pracovní látka zde není použita voda a její pára, ale směs organických sloučenin – silikonový olej. Ten má jiné termodynamické vlastnosti než voda (hlavní výhodou je nižší odpařovací teplota při pracovních tlacích), a je tak vhodný pro malé necentrální zařízení, ve kterých je i při nižších teplotách na vstupu možné dosáhnout vysokých účinností.

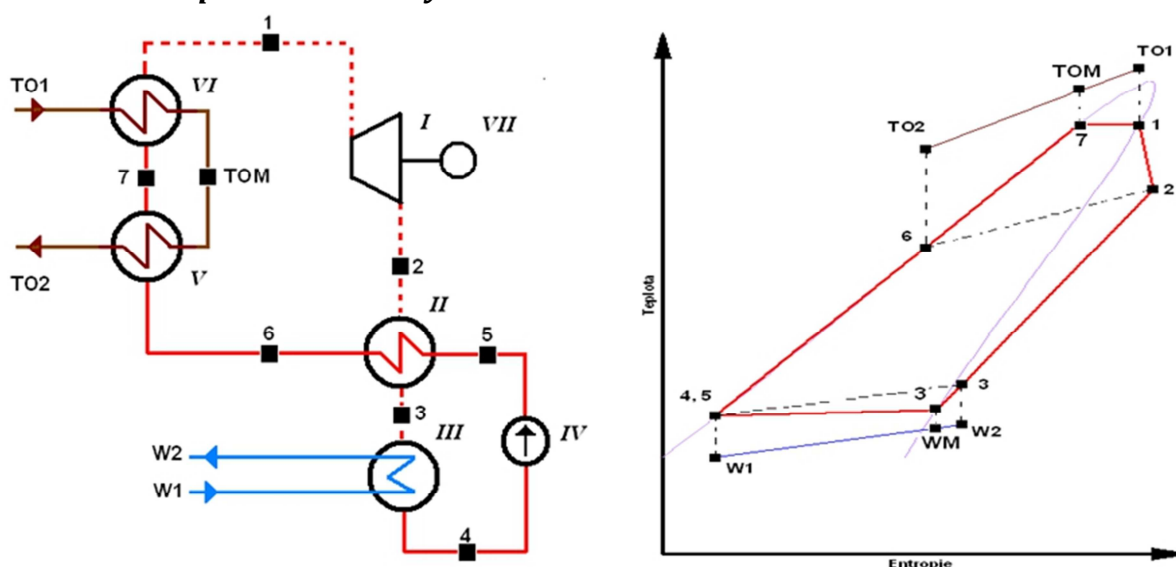
ORC technologie je tak vhodná zejména pro kombinovanou výrobu tepla a elektrické energie z biomasy, dále pro využívání nízko potenciálních zdrojů tepla jakými jsou např. solární energie, odpadní teplo z různých výrobních technologií, odpadní teplo spalín, geotermální energie atd.

ORC systémy jsou od výrobců dodávány jako standardizované moduly o elektrických výkonech řádově od stovek kWe do několika MWe.



Obr. 3-7 ORC jednotka, TTS Třebíč [22]

#### 3.3.2.1 Princip činnosti ORC cyklu



Obr. 3-8 Schéma a T-s diagram ORC cyklu [22]

Na obrázku 3-8 vidíme na levé straně schéma ORC cyklu, v pravé části je průběh zaznamenaný v T-s diagramu dané pracovní látky (silikonový olej).

Na počátku děje se pracovní látka nachází v kapalném stavu v zásobní nádrži (bod 4). Odtud je čerpadlem IV dopravována do ekonomizéru II, zároveň je tak zvýšen její tlak. V ekonomizéru je pracovní látka předehřáta nízkotlakou parou vystupující z turbíny. Nyní se nacházíme v bodě 6, pracovní látka vstupuje do výparníku V a VI, kde teplotnosné médium (termoolej) předává teplo pracovní látce, ta se dohřívá na stav sytosti (bod 7) a postupně se odpařuje na stav syté páry (bod 1). Sytá pára vstupuje na turbínu I (ta je spojena s elektrickým generátorem VII), kde expanduje. Pára pracovní látky expanduje do oblasti přehřáté páry (bod 2), což je specifikum organických látek, toho je pak možné využít v již zmiňovaném ekonomizéru (mezi body 2 a 3). Dále pracovní látka postupuje do kondenzátoru, kde veškerá pára zkondenzuje, dostáváme se tak do výchozího bodu a cyklus se opakuje. Teplo odvedené z kondenzátoru je možné dále využít např. pro vytápění a ohřev TUV.

### 3.3.2.2 Výhody ORC cyklu

- nižší otáčky turbíny umožňují přímý pohon generátoru bez převodovky
- minimální eroze lopatek turbíny vlivem absence kapiček pracovní látky
- možnost využití energie ze zdrojů s relativně nízkou teplotou
- nižší tlak a teplota v celém oběhu
- vyšší životnost
- nenáročnost na obsluhu
- odpadá nutnost doplňování a úpravy vody (úniky a doplňování organické pracovní látky v sekundárním okruhu jsou minimální)
- celkem vysoká účinnost při nižších teplotních spádech
- nižší provozní náklady [23]

### 3.3.3 Termoelektrický generátor

Termoelektrický generátor (TEG) je zařízení, které dokáže transformovat tepelnou energii přímo na energii elektrickou. TEG pracuje na základě Seebeckova efektu (opak Peltierova efektu) – jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu, protéká obvodem elektrický proud.

Doposud byly tyto aplikace používány hlavně tam, kde jejich vysoká spolehlivost a absence pohyblivých částí převyšovala nad jejich vysokou cenou a nízkou účinností, jedná se zejména o kosmický průmysl. Dnes jsou však ve fázi intenzivního vývoje a výzkumu a s rozvojem nových polovodičových materiálů a výrobních postupů se stávají účinnějšími a dostupnějšími. [8]

## 4 KONKRÉTNÍ NÁVRH NA ZVÝŠENÍ VÝROBY ELEKTRICKÉ ENERGIE NA BPS

### 4.1 Bioplynová stanice Kouty

#### 4.1.1 Popis stávající technologie

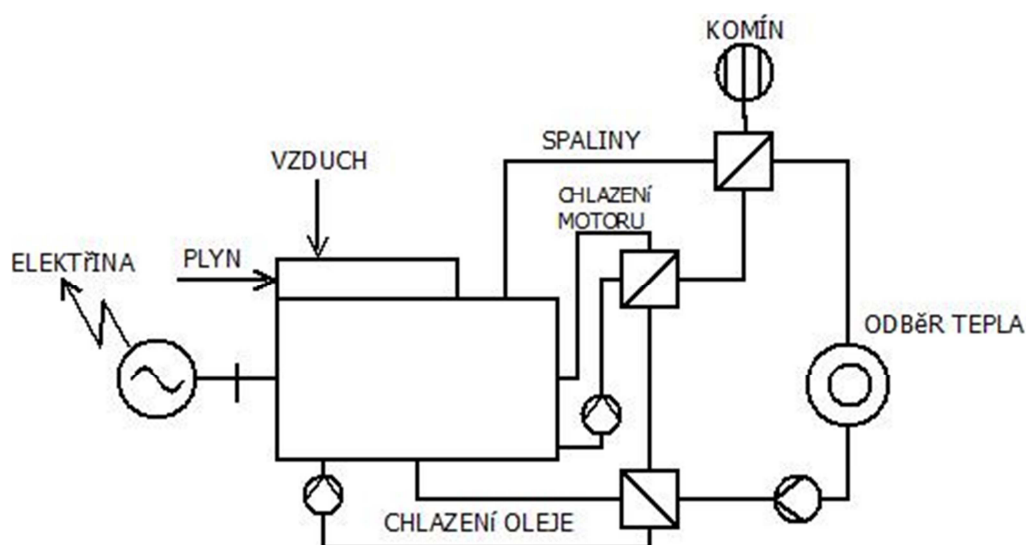
Stanice je situována v areálu zemědělského družstva, které leží nedaleko obce Kouty na Vysočině. Jedná se o typickou zemědělskou BPS, která vedle pěstované biomasy využívá kejdu a hnůj z místního chovu hovězího dobytka a prasat.

Stanice byla uvedena do provozu v roce 2008. Byla projektována na produkci bioplynu pro provoz dvou kogeneračních jednotek, každá o výkonu 250 kWe. Byly tak vystavěny dva fermentory prvního a druhého stupně, sklad digestátu a ostatní nezbytné součásti. Při výstavbě se však počítalo s tím, že bude stanice v budoucnu rozšířena, k čemuž došlo o rok později. Provoz byl doplněn třetí kogenerační jednotkou o stejném výkonu jako stávající dvě jednotky tedy 250 kWe. Původní sklad digestátu byl plynotěsně zastřešen a opatřen otopným systémem, vznikl tak třetí stupeň fermentace. Bylo tak dokázáno, že je produkce bioplynu v poslední fázi velmi nízká, v prvním stupni vzniká více než 70 %, ve druhém stupni přes 20 % a v posledním stupni je produkováno již jen několik procent celkové produkce bioplynu. Z posledního stupně je fermentát přečerpáván do dvojice otevřených koncových jímek (celkový objem okolo 8,7 tis. m<sup>3</sup>), jako stabilizovaný digestát, bez či jen s malou biologickou aktivitou a produkcí metanu.

Poslední úpravy se týkaly výstavby výměňkové stanice tepla a několika set metrů dlouhého teplovodu, který umožnil dodávat teplo mimo areál družstva do objektů bytového domu (13 bytových jednotek), obecního úřadu, pošty a místní restaurace se sálem. [26]

Bioplynová stanice Kouty	
Uvedení do provozu (rozšíření stanice)	Září 2008 (červenec 2009)
Investor	Zemědělské družstvo Kouty
Generální dodavatel	agriKomp Bohemia, s.r.o.
Instalovaný elektrický a tepelný výkon	750 kWe (3 x 250 kWe) 696 kWt (3 x 232 kWt)
Vstupní suroviny	Travní senáž (6 tis. tun), Kukuřičná siláž (5 tis. tun), Hovězí hnůj a kejda (11 tis. tun)
Investiční náklady	65 – 70 mil Kč
Objem fermentorů celkem/reakční	6900/6300 m <sup>3</sup>
Produkce elektřiny ročně brutto/netto	5,8 až 6,2 / 5,6 až 5,8 GWh
Produkce tepla ročně brutto/efektivně využito	5,5 až 5,8 / 1,1 až 1,9 GWh (4 až 7 TJ)
Orientační SEV <sub>BP</sub> *)	45 – 50 %
*) Stupeň energetického využití bioplynu = celková účinnost zdroje KVET	

Tab. 4-1 Souhrnná data z provozu BPS Kouty [26]

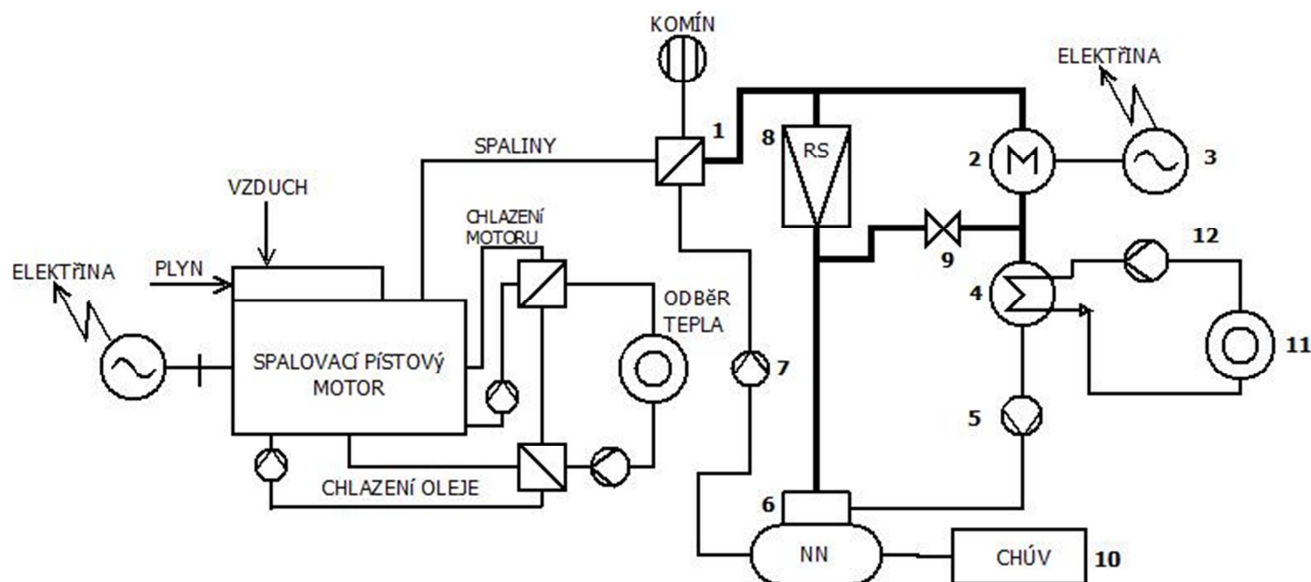


Obr. 4-1 Zjednodušené schéma stávajícího provozu

#### 4.1.2 Návrh na zlepšení ekonomie provozu využitím parního motoru

Na BPS Kouty je jen malá část produkovaného tepla efektivně využita a to zejména pro pokrytí vlastních potřeb tepla v areálu družstva a jako dodávky tepla externím odběratelům. Velká část tepelného výkonu tak není využita a vyprodukované teplo je tak bez užitku zmařeno. Instalaci parního motoru by mohla být velká část mařeného tepla využita na výrobu elektrické energie. Její prodej by mohl zlepšit ekonomii zařízení, byla by také zvýšena celková účinnost kogeneračního zdroje.

Na obrázku Obr. 4-2 je znázorněn možný způsob zapojení parního motoru za kogenerační jednotkou (spalovací pístový motor).



Obr. 4-2 Zapojení parního motoru za kogenerační jednotkou

Čísly 1 – 12 jsou označeny jednotlivé členy oběhu.

(1) výparník (parní generátor), (2) parní motor, (3) elektrický generátor, (4) kondenzátor, (5) kondenzátní čerpadlo, (6) napájecí nádrž, (7) napájecí čerpadlo, (8) redukční stanice, (9) uzavírací armatura, (10) chemická úprava vody, (11) spotřebič tepla (chladič), (12) oběhové čerpadlo.



### 4.1.3 Energetická bilance stávajícího provozu

#### Instalovaný elektrický výkon

$$P_{el} = 0,75 \text{ MW}$$

#### Instalovaný tepelný výkon

$$\dot{Q}_t = 0,696 \text{ MW}$$

#### Roční doba využití instalovaného výkonu

$$\tau_1 = 8000 \text{ h}$$

#### Celková roční výroba elektrické energie

$$E_{celk} = P_{el} \cdot \tau_1 = 0,75 \cdot 8000 = 6000 \text{ MWh}$$

#### Množství elektrické energie prodané do distribuční sítě za rok

$$E_1 = 5700 \text{ MWh}$$

#### Vlastní spotřeba elektrické energie na BPS za rok

$$E_{vlast} = E_{celk} - E_1 = 6000 - 5700 = 300 \text{ MWh}$$

#### Celková roční produkce tepla

$$Q_{celk} = \dot{Q}_t \cdot \tau_1 = 0,696 \cdot 8000 = 5568 \text{ MWh}$$

$$Q_{celk} = 20044,8 \text{ GJ}$$

#### Množství efektivně využitého tepla za rok

$$Q_{efekt} = 1500 \text{ MWh}$$

$$Q_{efekt} = 5400 \text{ GJ}$$

#### Množství zmařeného tepla za rok

$$Q_{zmar} = Q_{celk} - Q_{efekt} = 5568 - 1500 = 4068 \text{ MWh}$$

$$Q_{zmar} = 14644,8 \text{ GJ}$$

#### Vlastní spotřeba tepla na BPS za rok

V odborné literatuře se uvádí, že v provozu BPS je na technologie a otop fermentorů spotřebováno zhruba 15 – 45 % produkovaného tepla, z dostupných informací o BPS Kouty odhaduji vlastní spotřebu tepla na 20 % z celkové produkce.

$$Q_{vlast} = 0,2 \cdot 5568 = 1113,6 \text{ MWh}$$

$$Q_{vlast} = 4008,96 \text{ GJ}$$

#### Množství tepla za rok, prodaného koncovému odběrateli

$$Q_1 = Q_{efekt} - Q_{vlast} = 1500 - 1113,6 = 386,4 \text{ MWh}$$

$$Q_1 = 1391,04 \text{ GJ}$$

### 4.1.4 Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 50 kW

Je zde provedeno hodnocení projektu, při kterém by byl do stávajícího provozu instalován parní motor o elektrickém výkonu 50 kW. Parní motor bude provozován v kondenzačním režimu a nízkopotenciálové teplo odebírané z kondenzátoru již nebude dále jiným způsobem využíváno.

#### 4.1.4.1 Energetická bilance navrhovaného řešení

Vstupní údaje	Jednotka	Hodnota
Elektrický výkon	kW	50
Elektrická účinnost	%	16 *)
Doba využití instal. výkonu	h/rok	7000
*) Při kondenzačním provozu PM		

Tab. 4-2 Parametry PM potřebné pro výpočet, varianta 50 kW

**Instalovaný elektrický výkon PM**

$$P_{elPM} = 0,05 \text{ MW}$$

**Elektrická účinnost PM**

$$\eta_{PM}^e = 16 \%$$

**Potřebný tepelný příkon pro PM**

$$\dot{Q}_{PM}^p = \frac{P_{elPM}}{\eta_{PM}^e} = \frac{0,05}{0,16} = 0,3125 \text{ MW}$$

**Roční doba využití instalovaného výkonu PM**

$$\tau_2 = 7000 \text{ h}$$

**Množství potřebného tepla pro provoz PM za rok**

$$Q_{PM}^{sp} = \dot{Q}_{PM}^p \cdot \tau_2 = 0,3125 \cdot 7000 = 2187,5 \text{ MWh}$$

$$Q_{PM}^{sp} = 7875 \text{ GJ}$$

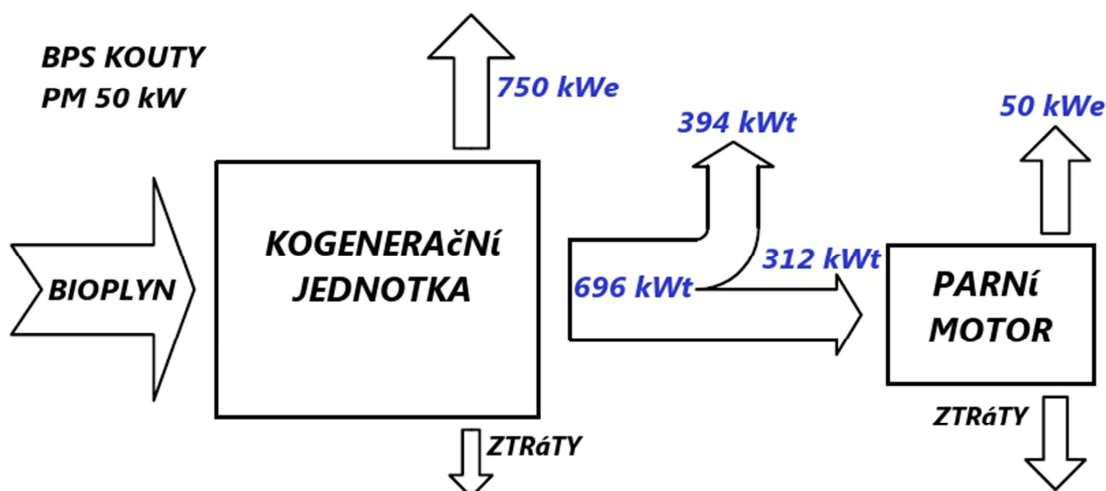
Při porovnání tepla potřebného pro provoz PM a tepla v současném provozu mařeného zjistíme, že:  $Q_{PM}^{sp} < Q_{zmar}$

$$7875 \text{ GJ} < 14644,8 \text{ GJ}$$

Provoz PM je tedy možné pokrýt z mařeného tepla a nijak neovlivní dodávky tepla odběratelům.

**Množství vyrobené elektrické energie parním motorem**

$$E_2 = P_{elPM} \cdot \tau_2 = 0,05 \cdot 7000 = 350 \text{ MWh}$$



Obr. 4-3 Bilanční schéma s parním motorem 50 kW

**4.1.4.2 Ekonomická analýza navrhovaného řešení**

V tabulce Tab. 4-3 jsou uvedeny základní ekonomické údaje potřebné pro ekonomické hodnocení projektu.

Vstupní údaje	Označení	Jednotka	Hodnota
Výkupní cena elektřiny dodané do sítě	$c_E$	Kč/MWh	3550*)
Zelený bonus	$c_{ZB}$	Kč/MWh	2500*)
Cena prodáváného tepla	$c_Q$	Kč/GJ	400

Diskontní sazba	$d$	%	5
Investiční náklady	$N_i$	tis. Kč	5500
Roční provozní náklady, servis	$N_p$	tis. Kč	40
Hodnocená doba životnosti	$T_{\dot{z}}$	r	10
*) Uvedené ceny jsou brány z cenového rozhodnutí ERÚ č. 7/2011 pro spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF2			

Tab. 4-3 Vstupní ekonomické údaje, varianta 50 kW

**Přípravné výpočty****Stávající provoz (bez PM)****Tržby za elektřinu**

$$\begin{aligned}
 T_{E1} &= E_1 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 5700 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 34485 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

$$T_{Q1} = Q_1 \cdot c_Q = 1391 \cdot 400 = 556,4 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T_{E1} + T_{Q1} = 34485 + 556,4 \\
 &= 35041,4 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Navrhované řešení (aplikace PM)****Tržby za elektřinu**

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$T_{E2} = T_{E1} = 34485 \text{ tis. Kč}$$

Elektřina z parního motoru:

$$\begin{aligned}
 T_{E2PM} &= E_2 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 350 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 2117,5 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

$$T_{Q2} = T_{Q1} = 556,4 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned}
 T_2 &= T_{E2} + T_{E2PM} + T_{Q2} \\
 &= 34485 + 2117,5 + 556,4 \\
 &= 37158,9 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Celkové roční výnosy z aplikace parního motoru**Uurčíme rozdílem celkových tržeb  $T_2$  a  $T_1$ :

$$V = T_2 - T_1 = 37158,9 - 35041,4 = \underline{\underline{2117,5 \text{ tis. Kč}}}$$

**Celkové roční náklady na provoz parního motoru**Roční náklady na provoz a servis parního motoru  $N_p$  jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-3:

$$N_p = 40 \text{ tis. Kč}$$

U parního motoru je nutné též provádět obsluhu a kontrolu 2x denně. Mzdové náklady s tím spojené zde však nejsou uvažovány. Obsluha a kontrola zde budou provedeny v rámci obsluhy celé bioplynové stanice.

$$N = N_p = \underline{\underline{40 \text{ tis. Kč}}}$$

**Ekonomická analýza z hlediska projektu**

**Cash flow v každém roce provozu** – tok hotovosti v daném roce v cenách daného roku, je dán rozdílem příjmů a výdajů v daném roce.

$$CF_0 = N_i = -5500 \text{ tis. Kč}$$

CF v nultém roce provozu = celkové investiční náklady

$$CF_1 = V - N = 2117,5 - 40 = 2077,5 \text{ tis. Kč}$$

CF v dalších letech = výnosy – náklady

**Kumulované cash flow** – kumulovaný tok hotovosti, průběžný součet všech toků hotovosti od nultého roku do daného roku

$$\Sigma CF_j = \sum_{t=0}^j CF_t$$

Například  $\Sigma CF$  pro 1. rok:

$$\Sigma CF_1 = \sum_{t=0}^1 CF_t = CF_0 + CF_1 = -5500 + 2077,5 = -3422,5 \text{ tis. Kč}$$

**Diskontované cash flow** – diskontovaný tok peněz, tok hotovosti vyjádřený v přepočtených cenách zohledňujících časovou hodnotu peněz

$$DCF_j = CF_j \cdot (1 + d)^{-j}, \text{ kde } d \text{ je diskontní sazba}$$

Například  $DCF$  pro 1. rok:

$$DCF_1 = CF_1 \cdot (1 + d)^{-j} = 2077,5 \cdot (1 + 0,05)^{-1} \doteq 1978,6 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované diskontované cash flow** – průběžný součet všech diskontovaných toků hotovosti od nultého roku do daného roku

$$\Sigma DCF_j = \sum_{t=0}^j DCF_t$$

Například  $\Sigma DCF$  pro 1. rok:

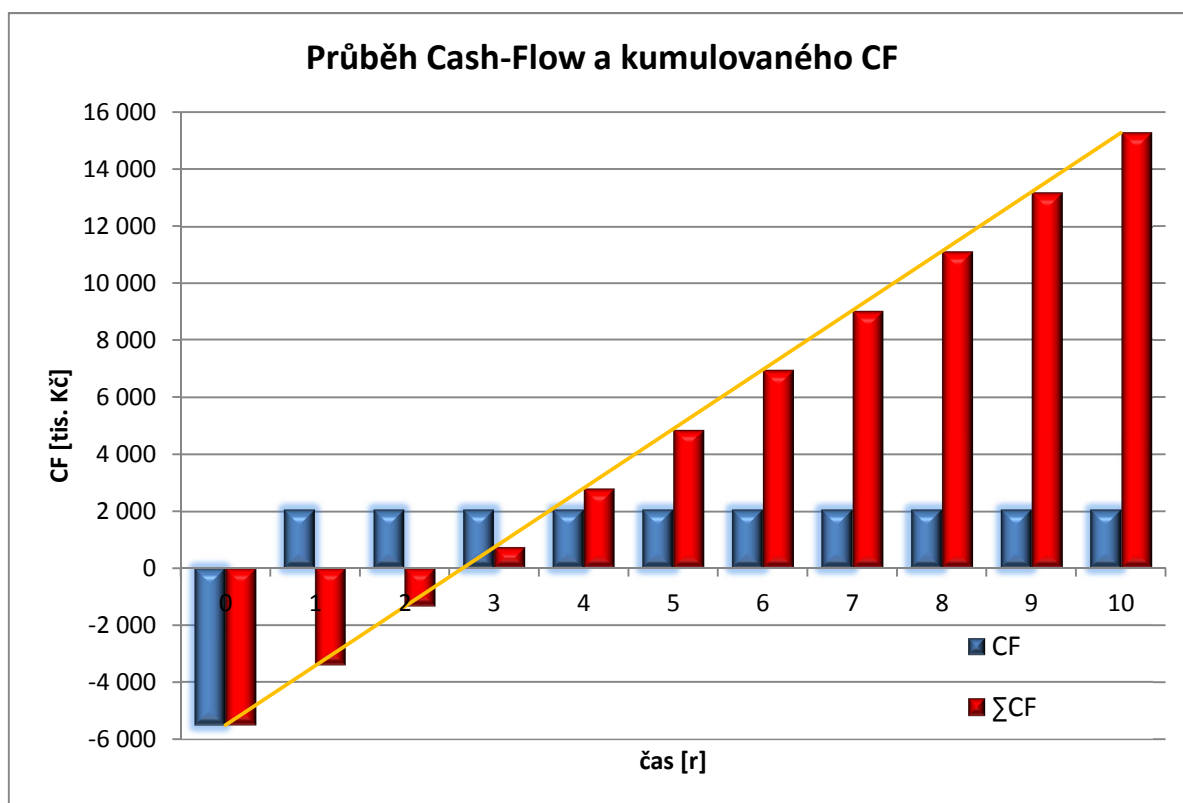
$$\Sigma DCF_1 = \sum_{t=0}^1 DCF_t = DCF_0 + DCF_1 = -5500 + 1978,6 \doteq -3521,4 \text{ tis. Kč}$$

**Ostatní výpočty jsou provedeny v MS Excel**

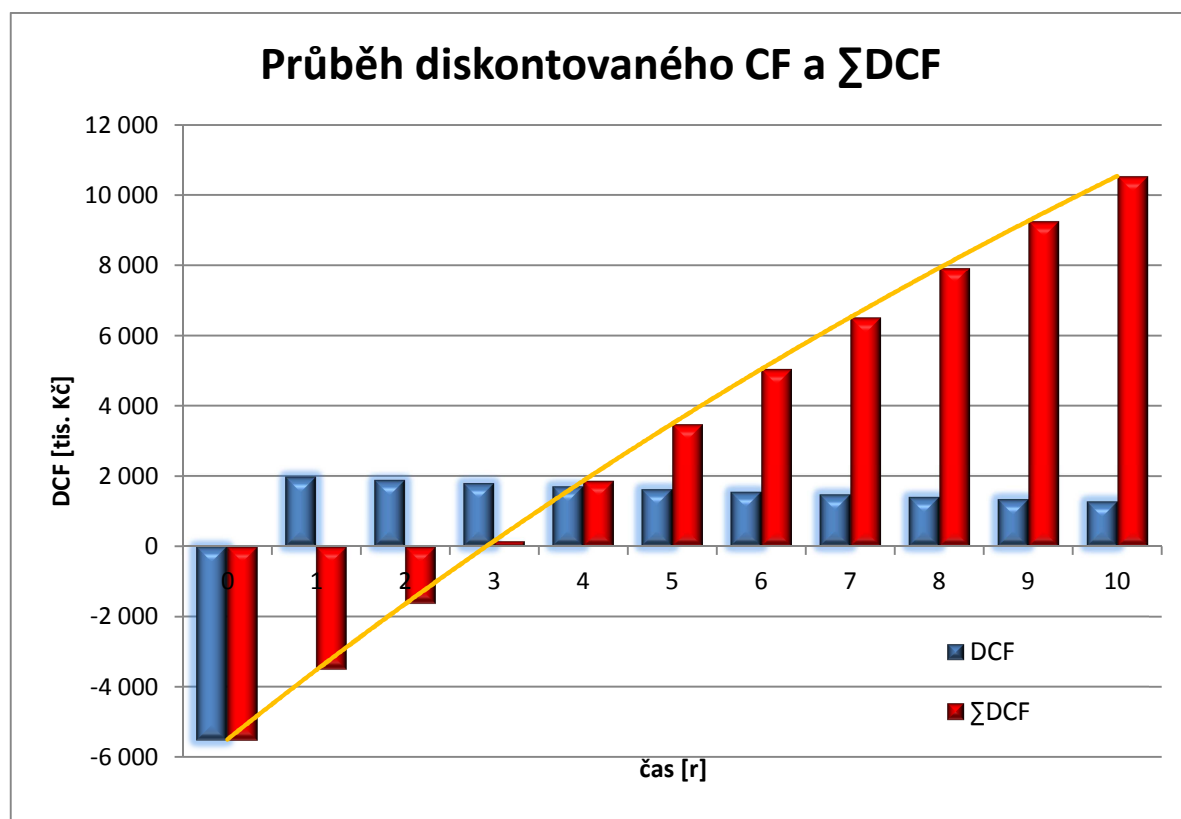
Rok (j)	N <sub>i</sub> [Kč]	CF [Kč]	ΣCF [Kč]	DCF [Kč]	ΣDCF [Kč]
0	5 500 000	-5 500 000	-5 500 000	-5 500 000	-5 500 000
1		2 077 500	-3 422 500	1 978 571	-3 521 429
2		2 077 500	-1 345 000	1 884 354	-1 637 075
3		2 077 500	732 500	1 794 623	157 548
4		2 077 500	2 810 000	1 709 164	1 866 712
5		2 077 500	4 887 500	1 627 776	3 494 488
6		2 077 500	6 965 000	1 550 262	5 044 750
7		2 077 500	9 042 500	1 476 440	6 521 191
8		2 077 500	11 120 000	1 406 134	7 927 325
9		2 077 500	13 197 500	1 339 175	9 266 500
10		2 077 500	15 275 000	1 275 405	10 541 904

**Tab. 4-4** Peněžní toky v jednotlivých letech provozu, varianta 50 kW

## Grafické zpracování



Obr. 4-4 Graf znázorňující peněžní toky v jednotlivých letech, bez diskontování, varianta 50 kW



Obr. 4-5 Graf znázorňující průběh peněžních toků v jednotlivých letech s diskontováním, varianta 50 kW

**Prostá doba splatnosti** – doba potřebná pro úhradu celkových investičních nákladů čistými příjmy projektu (slouží jako první orientační kritérium, není zde respektována časová hodnota peněz)

$$T_0 = \frac{N_i}{CF} = \frac{5500}{2077,5} \doteq 2,65 \text{ roků}$$

**Diskontovaná doba splatnosti** – doba potřebná pro úhradu celkových investičních nákladů čistými příjmy projektu při respektování časové hodnoty peněz

$$T_s = \frac{\ln \frac{1}{1 - T_0 d}}{\ln(1 + d)} = \frac{\ln \frac{1}{1 - 2,65 \cdot 0,05}}{\ln(1 + 0,05)} \doteq \underline{2,91 \text{ roků}}$$

**Vnitřní výnosové procento** – (IRR = Internal Rate of Return), jedná se o nejnižší diskontní sazbu, při které projekt ještě není ztrátový. Pokud je IRR vyšší než uvažovaná diskontní sazba, je projekt ekonomicky přínosný.

$$u_i = \frac{CF}{N_i} \cdot \frac{r_i^{T_z} - 1}{r_i^{T_z}}, \text{ kde} \quad r_i = 1 + u_i$$

$u_i$  bylo vypočítáno postupnou iterací v MS Excel:

$$u_i \doteq 0,342 \quad \underline{u_i \doteq 34,2\%}$$

#### 4.1.5 Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 100 kW

Je zde provedeno hodnocení projektu, při kterém by byl do stávajícího provozu instalován parní motor o elektrickém výkonu 100 kW. Parní motor bude provozován v kondenzačním režimu a nízkopotenciálové teplo odebírané z kondenzátoru již nebude dále jiným způsobem využíváno.

##### 4.1.5.1 Energetická bilance navrhovaného řešení

Vstupní údaje	Jednotka	Hodnota
Elektrický výkon	kW	100
Elektrická účinnost	%	16 *)
Doba využití instal. výkonu	h/rok	7000
*) Při kondenzačním provozu PM		

Tab. 4-5 Parametry PM potřebné pro výpočet, varianta 100 kW

#### Instalovaný elektrický výkon PM

$$P_{elPM} = 0,1 \text{ MW}$$

#### Elektrická účinnost PM

$$\eta_{PM}^e = 16 \%$$

#### Potřebný tepelný příkon pro PM

$$\dot{Q}_{PM}^p = \frac{P_{elPM}}{\eta_{PM}^e} = \frac{0,1}{0,16} = 0,625 \text{ MW}$$

#### Roční doba využití instalovaného výkonu PM

$$\tau_2 = 7000 \text{ h}$$

**Množství potřebného tepla pro provoz PM za rok**

$$Q_{PM}^{sp} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \tau_2 = 0,625 \cdot 7000 = 4375 \text{ MWh}$$

$$Q_{PM}^{sp} = 15750 \text{ GJ}$$

Při porovnání tepla potřebného pro provoz PM a tepla v současném provozu mařeného zjistíme, že:  $Q_{PM}^{sp} > Q_{zmar}$

$$15750 \text{ GJ} > 14644,8 \text{ GJ}$$

Provoz PM tedy není možné pokrýt z mařeného tepla, pro pokrytí celkové potřeby by bylo možné použít část tepla, které je prodáváno zákazníkům, ale pravděpodobně by bylo nutné tuto část nahradit jiným zdrojem například zemním plynem. V tomto případě, kdy rozdíl není tak markantní bude výhodnější snížit roční využití, tak aby bylo dostačující mařené teplo:

$$\tau_2 = \frac{Q_{zmar}}{\dot{Q}_{PM}^P} = \frac{4068}{0,625} = 6508,8h$$

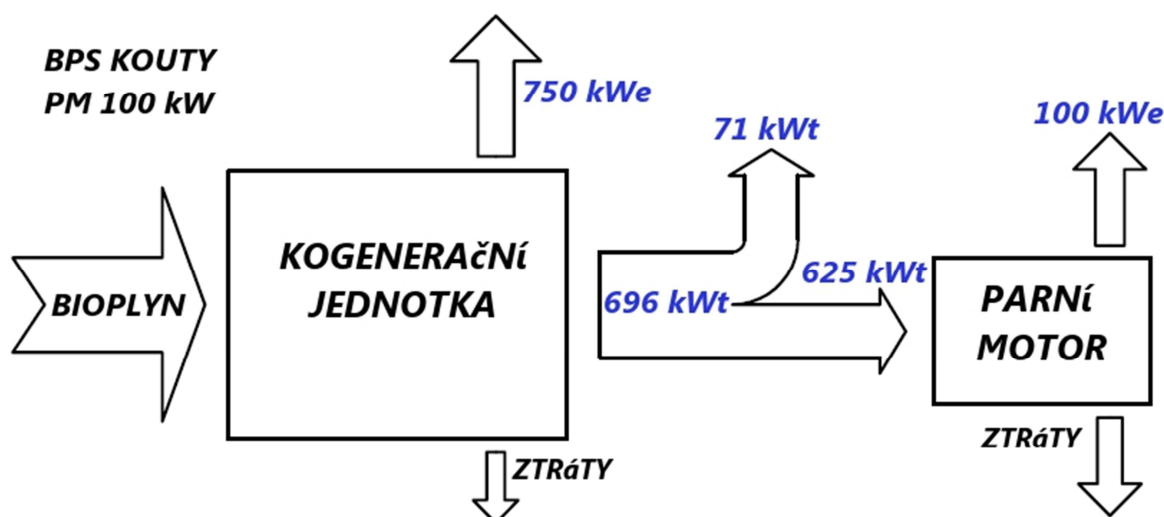
Volím  $\tau_2 = 6500h$ , pak

$$Q_{PM}^{sp} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \tau_2 = 0,625 \cdot 6500 = 4062,5 \text{ MWh}$$

$$Q_{PM}^{sp} = 14625 \text{ GJ}$$

**Množství vyrobené elektrické energie parním motorem**

$$E_2 = P_{elPM} \cdot \tau_2 = 0,1 \cdot 6500 = 650 \text{ MWh}$$



Obr. 4-6 Bilanční schéma s parním motorem 100 kW

**4.1.5.2 Ekonomická analýza navrhovaného řešení**

V tabulce Tab. 4-6 jsou uvedeny základní ekonomické údaje potřebné pro ekonomické hodnocení projektu.

Vstupní údaje	Označení	Jednotka	Hodnota
Výkupní cena elektrické energie	$c_E$	Kč/MWh	3550*)
Zelený bonus	$c_{ZB}$	Kč/MWh	2500*)
Cena prodáváného tepla	$c_Q$	Kč/GJ	400
Diskontní sazba	$d$	%	5
Investiční náklady	$N_i$	tis. Kč	8800

Roční provozní náklady, servis	$N_p$	tis. Kč	80
Hodnocená doba životnosti	$T_z$	r	10
*) Uvedené ceny jsou brány z cenového rozhodnutí ERÚ č. 7/2011 pro spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF2			

Tab. 4-6 Vstupní ekonomické údaje, varianta 100 kW

**Přípravné výpočty****Stávající provoz (bez PM)****Tržby za elektřinu**

$$\begin{aligned}
 T_{E1} &= E_1 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 5700 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 34485 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

$$T_{Q1} = Q_1 \cdot c_Q = 1391 \cdot 400 = 556,4 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned}
 T_1 &= T_{E1} + T_{Q1} = 34485 + 556,4 \\
 &= 35041,4 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Navrhované řešení (aplikace PM)****Tržby za elektřinu**

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$T_{E2} = T_{E1} = 34485 \text{ tis. Kč}$$

Elektřina z parního motoru:

$$\begin{aligned}
 T_{E2PM} &= E_2 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 650 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 3932,5 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

$$T_{Q2} = T_{Q1} = 556,4 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned}
 T_2 &= T_{E2} + T_{E2PM} + T_{Q2} \\
 &= 34485 + 3932,5 + 556,4 \\
 &= 38950,3 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Celkové roční výnosy z aplikace parního motoru**Uurčíme rozdílem celkových tržeb  $T_2$  a  $T_1$ :

$$V = T_2 - T_1 = 38950,3 - 35041,4 = \underline{\underline{3932,5 \text{ tis. Kč}}}$$

**Celkové roční náklady na provoz parního motoru**Roční náklady na provoz a servis parního motoru  $N_p$  jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-6:

$$N_p = 80 \text{ tis. Kč}$$

U parního motoru je nutné též provádět obsluhu a kontrolu 2x denně. Mzdové náklady s tím spojené zde však nejsou uvažovány. Obsluha a kontrola zde budou provedeny v rámci obsluhy celé bioplynové stanice.

$$N = N_p = \underline{\underline{80 \text{ tis. Kč}}}$$

**Ekonomická analýza z hlediska projektu****Cash flow v každém roce provozu**

$$CF_0 = N_i = -8800 \text{ tis. Kč}$$

$$CF_1 = V - N = 3932,5 - 80 = 3852,5 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované cash flow**Například  $\Sigma CF$  pro 1. rok:

$$\Sigma CF_1 = \sum_{t=0}^1 CF_t = CF_0 + CF_1 = -8800 + 3852,5 = -4947,5 \text{ tis. Kč}$$



**Diskontované cash flow**Například  $DCF$  pro 1. rok:

$$DCF_1 = CF_1 \cdot (1 + d)^{-j} = 3852,5 \cdot (1 + 0,05)^{-1} \doteq 3669 \text{ tis. Kč}$$

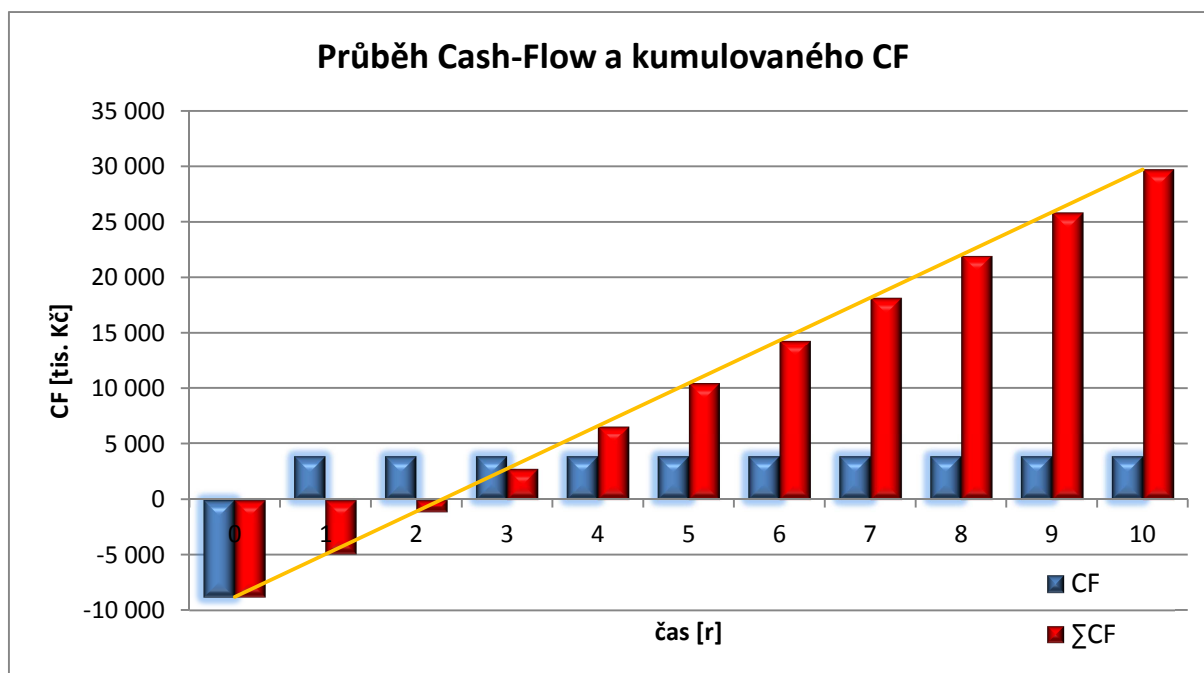
**Kumulované diskontované cash flow**Například  $\Sigma DCF$  pro 1. rok:

$$\Sigma DCF_1 = \sum_{t=0}^1 DCF_t = DCF_0 + DCF_1 = -8800 + 3669 \doteq -5131 \text{ tis. Kč}$$

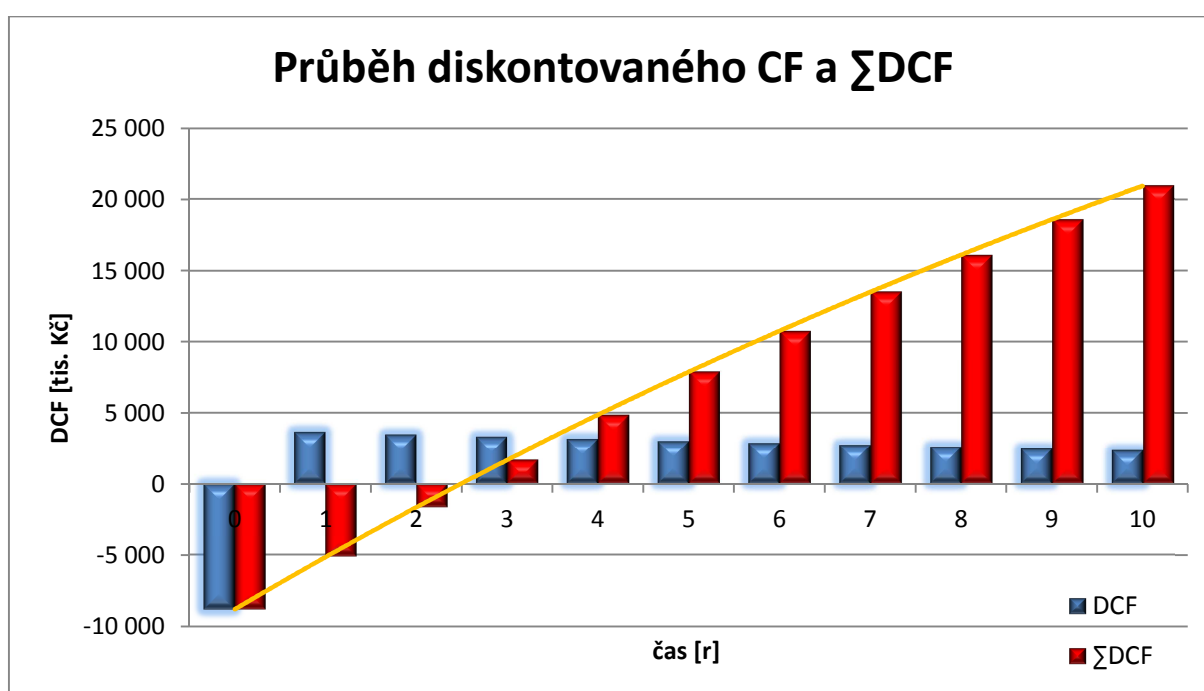
**Ostatní výpočty jsou provedeny v MS Excel**

Rok (j)	$N_i$ [Kč]	CF [Kč]	$\Sigma CF$ [Kč]	DCF [Kč]	$\Sigma DCF$ [Kč]
0	8 800 000	-8 800 000	-8 800 000	-8 800 000	-8 800 000
1		3 852 500	-4 947 500	3 669 048	-5 130 952
2		3 852 500	-1 095 000	3 494 331	-1 636 621
3		3 852 500	2 757 500	3 327 934	1 691 313
4		3 852 500	6 610 000	3 169 461	4 860 774
5		3 852 500	10 462 500	3 018 535	7 879 309
6		3 852 500	14 315 000	2 874 795	10 754 104
7		3 852 500	18 167 500	2 737 900	13 492 004
8		3 852 500	22 020 000	2 607 524	16 099 527
9		3 852 500	25 872 500	2 483 356	18 582 883
10		3 852 500	29 725 000	2 365 101	20 947 984

Tab. 4-7 Peněžní toky v jednotlivých letech provozu, varianta 100 kW

**Grafické zpracování**

Obr. 4-7 Graf znázorňující peněžní toky v jednotlivých letech, bez diskontování, varianta 100 kW



**Obr. 4-8** Graf znázorňující průběh peněžních toků v jednotlivých letech s diskontováním, varianta 100 kW

#### Prostá doba splatnosti

$$T_0 = \frac{N_i}{CF} = \frac{8800}{3852,5} \doteq 2,28 \text{ roků}$$

#### Diskontovaná doba splatnosti

$$T_s = \frac{\ln \frac{1}{1 - T_0 d}}{\ln(1 + d)} = \frac{\ln \frac{1}{1 - 2,28 \cdot 0,05}}{\ln(1 + 0,05)} \doteq 2,49 \text{ roků}$$

#### Vnitřní výnosové procento

$$u_i = \frac{CF}{N_i} \cdot \frac{r_i^{T_z} - 1}{r_i^{T_z}}, \text{ kde}$$

$$r_i = 1 + u_i$$

$u_i$  bylo vypočítáno postupnou iterací v MS Excel:

$$u_i \doteq 0,425$$

$$\underline{u_i \doteq 42,5\%}$$

## 4.2 Bioplynová stanice Větrný Jeníkov

### 4.2.1 Popis stávající technologie

Bioplynová stanice je součástí společnosti ZEVAR s.r.o., která je výrobcem, kvasného lihu a producentem výrobků na jeho bázi.

Technologické uspořádání bioplynové stanice odpovídá základní koncepci mokré fermentace. Objekty fermentorů jsou vybudovány jako částečně zapuštěné pod úroveň terénu, jsou vybaveny otopným systémem a míchací technikou a jsou náležitě zatepleny. Součástí fermentorů je betonová podzemní vstupní jímka, která je určena k míšení doplňkových substrátů, jímka je vybavena řezacím čerpadlem, které slouží k dezintegraci větších částí.

Základním energetickým vstupem BPS jsou lihovarnické výpalky. Tento základní substrát je doplňován obilným šrotem, odpady ze zpracování brambor a výroby bionafty, popřípadě malým množstvím cíleně pěstované biomasy.

Vyrobený bioplyn je skladován v dvouplášťových plynojemech nasazených na všech reakčních nádržích. Vzhledem k používanému substrátu obsahuje bioplyn velké množství sulfanu. Pracovní objem plynojemu tak zároveň slouží k odstranění části sulfanu (zhruba 1/2) metodou mikrobiologické oxidace za vzniku elementární síry, která se uvolňuje do digestátu. Takto částečně odsířený bioplyn vstupuje z plynojemu do technologie sekundárního odsíření, kterou tvoří kolona s náplní absorbentu (směs mechanického nosiče a práškového železa), reakcí s absorbentem dojde k vytvoření sulfidu železitého. Bioplyn následně vstupuje do kontejneru technologie bioplynu, kde je zbaven vlhkosti a stlačen na požadovaný tlak. Probíhá zde také kontinuální analýza plynu a v případě potřeby je zapojen třetí stupeň odsíření (adsorpce na aktivní uhlí). Odtud je bioplyn veden do současné kotelny lihovaru, kde je instalována kogenerační jednotka. Případné přebytky bioplynu jsou odváděny do hořáků stávajících plynových kotlů, v provozu tak není nutný nouzový hořák tzv. fléra.

Instalovaná kogenerační jednotka má elektrický výkon 800 kWe a tepelný výkon 769 kWt. Část vyrobené elektrické energie je využita pro vlastní spotřebu, zbytek je prodáván do distribuční sítě. Tepelná energie, která je produkována kogenerační jednotkou, je plně využita v tepelném hospodářství lihovaru. [26]

Bioplynová stanice Větrný Jeníkov	
Uvedení do provozu (rozšíření stanice)	Listopad 2011
Investor	ZEVAR s.r.o.
Generální dodavatel	FERMGAS, a.s.
Instalovaný elektrický a tepelný výkon	800 kWe 769 kWt
Vstupní suroviny	Lihovarské výpalky (40,2 tis. tun), Odpad bramborové vlákniny ze škrobáren (3,7 tis. tun), Obilný šrot (1 tis. tun)
Investiční náklady	70 mil Kč
Objem fermentorů celkem/reakční	6551/6176 m <sup>3</sup>
Produkce elektřiny ročně brutto/netto	6 až 6,4 / 5,7 až 5,9 GWh
Produkce tepla ročně brutto/efektivně využito	6 až 6,5 / 6 až 6,5 GWh (20 až 23 TJ)
Orientační SEV <sub>BP</sub> *)	75 – 80 %
*) Stupeň energetického využití bioplynu = celková účinnost zdroje KVET	

Tab. 4-8 Souhrnná data z provozu BPS Větrný Jeníkov [26]

#### 4.2.2 Návrh na zlepšení ekonomie provozu využitím parního motoru

BPS Větrný Jeníkov je součástí lihovarnické výroby. Teplo produkováno kogenerační jednotkou je využíváno v provozu lihovaru. Instalací parního motoru by byla zvýšena výroba elektrické energie a zvýšena tak elektrická účinnost bioplynové stanice. Díky zvýhodněným výkupním cenám elektrické energie z obnovitelných zdrojů by tak mohla být zlepšena

ekonomie provozu. Teplo, které je však beze zbytku využíváno a které by bylo odebráno parním motorem na výrobu elektřiny, by muselo být nahrazeno jiným zdrojem, například zemním plynem.

#### 4.2.3 Energetická bilance stávajícího provozu

**Instalovaný elektrický výkon**

$$P_{el} = 0,8 \text{ MW}$$

**Instalovaný tepelný výkon**

$$\dot{Q}_t = 0,769 \text{ MW}$$

**Roční doba využití instalovaného výkonu**

$$\tau_1 = 7800 \text{ h}$$

**Celková roční výroba elektrické energie**

$$E_{celk} = P_{el} \cdot \tau_1 = 0,8 \cdot 7800 = 6240 \text{ MWh}$$

**Množství elektrické energie prodané do distribuční sítě za rok**

$$E_1 = 5800 \text{ MWh}$$

**Vlastní spotřeba elektrické energie na BPS za rok**

$$E_{vlast} = E_{celk} - E_1 = 6240 - 5800 = 440 \text{ MWh}$$

**Celková roční produkce tepla**

$$Q_{celk} = \dot{Q}_t \cdot \tau_1 = 0,769 \cdot 7800 \doteq 6000 \text{ MWh}$$

$$Q_{celk} = 21600 \text{ GJ}$$

**Množství efektivně využitého tepla za rok**

$$Q_{efekt} = 6000 \text{ MWh}$$

$$Q_{efekt} = 21600 \text{ GJ}$$

**Množství zmařeného tepla za rok**

$$Q_{zmar} = Q_{celk} - Q_{efekt} = 6000 - 6000 = 0 \text{ MWh}$$

$$Q_{zmar} = 0 \text{ GJ}$$

**Vlastní spotřeba tepla na BPS za rok**

V odborné literatuře se uvádí, že v provozu BPS je na technologie a otop fermentorů spotřebováno zhruba 15 – 45 % produkovaného tepla, z dostupných informací o BPS Větrný Jeníkov odhadují vlastní spotřebu tepla na 20 % z celkové produkce.

$$Q_{vlast} = 0,2 \cdot 6000 = 1200 \text{ MWh}$$

$$Q_{vlast} = 4320 \text{ GJ}$$

**Množství tepla za rok, prodaného koncovému odběrateli**

Produkované teplo není prodáváno odběratelům, ale je využíváno v lihovarnickém provozu. Z ekonomického hlediska nám toto teplo tvoří jakousi úsporu a můžeme s ním počítat, jako kdyby bylo prodáno.

$$Q_1 = Q_{efekt} - Q_{vlast} = 6000 - 1200 = 4800 \text{ MWh}$$

$$Q_1 = 17280 \text{ GJ}$$

#### 4.2.4 Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 50 kW

Je zde provedeno hodnocení projektu, při kterém by byl do stávajícího provozu instalován parní motor o elektrickém výkonu 50 kW. Parní motor bude provozován v protitlakém režimu a teplo odebírané z kondenzátoru bude dále jiným způsobem využíváno.

**4.2.4.1 Energetická bilance navrhovaného řešení**

Vstupní údaje	Jednotka	Hodnota
Elektrický výkon	kW	50
Elektrická účinnost	%	14 *)
Tepelná účinnost	%	61
Doba využití instal. výkonu	h/rok	7000
*) Při protitlakém provozu PM		

Tab. 4-9 Parametry PM potřebné pro výpočet, varianta 50 kW

**Instalovaný elektrický výkon PM**

$$P_{elPM} = 0,05 \text{ MW}$$

**Elektrická účinnost PM**

$$\eta_{PM}^e = 14 \%$$

**Potřebný tepelný příkon pro PM**

$$\dot{Q}_{PM}^P = \frac{P_{elPM}}{\eta_{PM}^e} = \frac{0,05}{0,14} = 0,3571 \text{ MW}$$

**Roční doba využití instalovaného výkonu PM**

$$\tau_2 = 7000 \text{ h}$$

**Množství potřebného tepla pro provoz PM za rok**

$$Q_{PM}^{sp} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \tau_2 = 0,3571 \cdot 7000 = 2500 \text{ MWh}$$

$$Q_{PM}^{sp} = 9000 \text{ GJ}$$

**Množství vyrobené elektrické energie parním motorem**

$$E_2 = P_{elPM} \cdot \tau_2 = 0,05 \cdot 7000 = \underline{350 \text{ MWh}}$$

**Tepelná účinnost PM**

$$\eta_{PM}^q = 61 \%$$

**Tepelný výkon parního motoru**

$$\dot{Q}_{PM} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \eta_{PM}^q = 0,3571 \cdot 0,61 = 0,2178 \text{ MW}$$

**Množství využitého tepla z parního motoru za rok**

$$Q_2 = \dot{Q}_{PM} \cdot \tau_2 = 0,2178 \cdot 7000 = \underline{1525 \text{ MWh}}$$

$$Q_2 = 5490 \text{ GJ}$$

**Množství tepla, které je nutné nahradit zemním plynem**

$$Q_{nahrazené} = Q_{PM}^{sp} - Q_2 = 2500 - 1525 = \underline{975 \text{ MWh}}$$

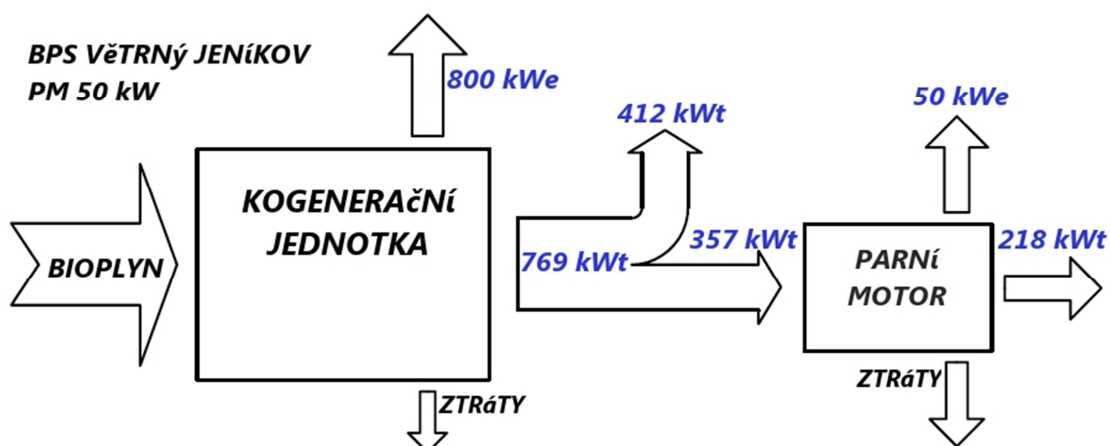
$$Q_{nahrazené} = 3510 \text{ GJ}$$

**Množství tepla za rok, které je nutné přivést v zemním plynu – slouží k určení nákladů na palivo**

$$Q_{ZP} = \frac{Q_{nahrazené}}{\eta_K} = \frac{975}{0,9} = \underline{1083,3 \text{ MWh}}$$

$$Q_{ZP} = 3900 \text{ GJ}$$

$$\eta_K [-] \quad \text{účinnost spalovacího zařízení}$$



Obr. 4-9 Bilanční schéma s parním motorem 50 kW

#### 4.2.4.2 Ekonomická analýza navrhovaného řešení

V tabulce Tab. 4-10 jsou uvedeny základní ekonomické údaje potřebné pro ekonomické hodnocení projektu.

Vstupní údaje	Označení	Jednotka	Hodnota
Výkupní cena elektřiny dodané do sítě	$c_E$	Kč/MWh	3550*)
Zelený bonus	$c_{ZB}$	Kč/MWh	2500*)
Cena prodáváného tepla	$c_Q$	Kč/GJ	400
Cena zemního plynu	$c_{ZP}$	Kč/MWh	900**)
Diskontní sazba	$d$	%	5
Investiční náklady	$N_i$	tis. Kč	5500
Roční provozní náklady, servis	$N_p$	tis. Kč	40
Hodnocená doba životnosti	$T_z$	r	10

\*) Uvedené ceny jsou brány z cenového rozhodnutí ERÚ č. 7/2011 pro spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF2

\*\*) Ceny ZP nejsou pro velké a střední odběratele paušálně stanoveny, jsou stanoveny na základě smlouvy, cena ZP je odhadnuta

Tab. 4-10 Vstupní ekonomické údaje, varianta 50 kW

#### Přípravné výpočty

Stávající provoz (bez PM)

Tržby za elektřinu

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$\begin{aligned}
 T_{E1} &= E_1 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 5800 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 35090 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

Navrhované řešení (aplikace PM)

Tržby za elektřinu

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$T_{E2} = T_{E1} = 35090 \text{ tis. Kč}$$

Elektřina z parního motoru:

$$\begin{aligned}
 T_{E2PM} &= E_2 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\
 &= 350 \cdot (3550 + 2500) \\
 &= 2117,5 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

Teplo z kogenerační jednotky:

$$T_{Q1} = Q_1 \cdot c_Q = 17280 \cdot 400 \\ = 6912 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$T_1 = T_{E1} + T_{Q1} = 35090 + 6912 \\ = 42002 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby za teplo**

Teplo z kogenerační jednotky:

$$T_{Q2} = (Q_1 - Q_{PM}^{sp}) \cdot c_Q \\ = (17280 - 9000) \cdot 400 \\ = 3312 \text{ tis. Kč}$$

Teplo z parního motoru:

$$T_{Q2PM} = Q_2 \cdot c_Q = 5490 \cdot 400 \\ = 2196 \text{ tis. Kč}$$

Teplo ze zemního plynu:

$$T_{QZP} = Q_{nahrazené} \cdot c_Q = 3510 \cdot 400 \\ = 1404 \text{ tis. Kč}$$

**Tržby celkem**

$$T_2 = T_{E2} + T_{E2PM} + T_{Q2} + T_{Q2PM} + T_{ZP} \\ = 35090 + 2117,5 + 3312 \\ + 2196 + 1404 \\ = 44119,5 \text{ tis. Kč}$$

**Celkové roční výnosy z aplikace parního motoru**Určíme rozdílem celkových tržeb  $T_2$  a  $T_1$ :

$$V = T_2 - T_1 = 44119,5 - 42002 = \underline{2117,5 \text{ tis. Kč}}$$

**Celkové roční náklady při provozu s parním motorem**Roční náklady na provoz a servis parního motoru  $N_p$  jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-10:

$$N_p = 40 \text{ tis. Kč}$$

U parního motoru je nutné též provádět obsluhu a kontrolu 2x denně. Mzdové náklady s tím spojené zde však nejsou uvažovány. Obsluha a kontrola zde budou provedeny v rámci obsluhy celé bioplynové stanice.

Náklady na palivo pro náhradu odebraného tepla:

$$N_{ZP} = Q_{ZP} \cdot c_{ZP} = 1083,3 \cdot 900 = 975 \text{ tis. Kč}$$

$$N = N_p + N_{ZP} = 40 + 975 = \underline{1015 \text{ tis. Kč}}$$

**Ekonomická analýza z hlediska projektu****Cash flow v každém roce provozu**

$$CF_0 = N_i = -5500 \text{ tis. Kč}$$

$$CF_1 = V - N = 2117,5 - 1015 = 1102,5 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované cash flow**Například  $\Sigma CF$  pro 1. rok:

$$\Sigma CF_1 = \sum_{t=0}^1 CF_t = CF_0 + CF_1 = -5500 + 1102,5 = -4397,5 \text{ tis. Kč}$$

**Diskontované cash flow**Například  $DCF$  pro 1. rok:

$$DCF_1 = CF_1 \cdot (1 + d)^{-j} = 1102,5 \cdot (1 + 0,05)^{-1} \doteq 1050 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované diskontované cash flow**

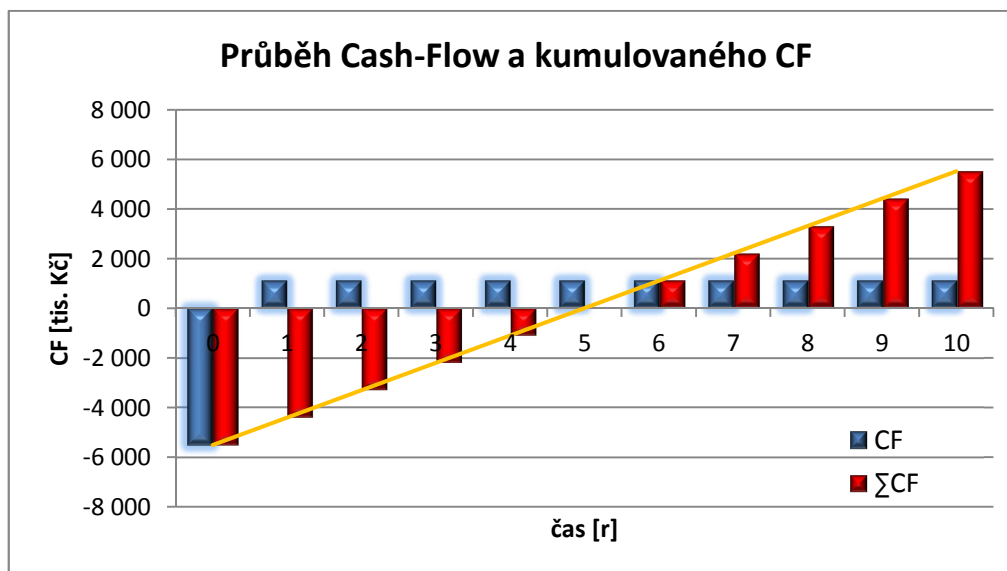
Například  $\Sigma DCF$  pro 1. rok:

$$\Sigma DCF_1 = \sum_{t=0}^1 DCF_t = DCF_0 + DCF_1 = -5500 + 1050 \doteq -4450 \text{ tis. Kč}$$

Ostatní výpočty jsou provedeny v MS Excel

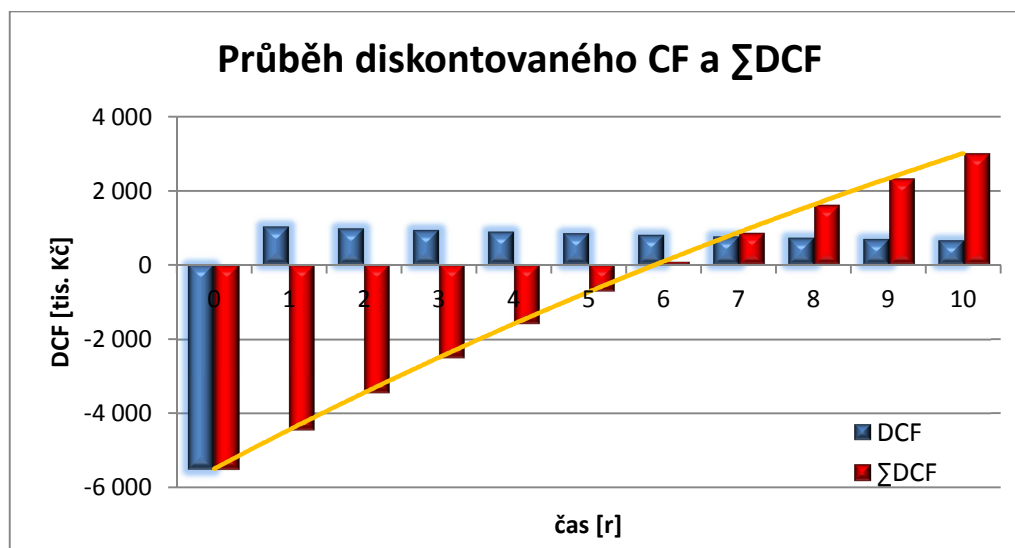
Rok (j)	$N_i$ [Kč]	CF [Kč]	$\Sigma CF$ [Kč]	DCF [Kč]	$\Sigma DCF$ [Kč]
0	5 500 000	-5 500 000	-5 500 000	-5 500 000	-5 500 000
1		1 102 500	-4 397 500	1 050 000	-4 450 000
2		1 102 500	-3 295 000	1 000 000	-3 450 000
3		1 102 500	-2 192 500	952 381	-2 497 619
4		1 102 500	-1 090 000	907 029	-1 590 590
5		1 102 500	12 500	863 838	-726 752
6		1 102 500	1 115 000	822 702	95 951
7		1 102 500	2 217 500	783 526	879 477
8		1 102 500	3 320 000	746 215	1 625 692
9		1 102 500	4 422 500	710 681	2 336 373
10		1 102 500	5 525 000	676 839	3 013 213

Tab. 4-11 Peněžní toky v jednotlivých letech provozu, varianta 50 kW

**Grafické zpracování**

Obr. 4-10 Graf znázorňující peněžní toky v jednotlivých letech, bez diskontování, varianta 50 kW





Obr. 4-11 Graf znázorňující průběh peněžních toků v jednotlivých letech s diskontováním, varianta 50 kW

**Prostá doba splatnosti**

$$T_0 = \frac{N_i}{CF} = \frac{5500}{1102,5} \doteq 4,99 \text{ roků}$$

**Diskontovaná doba splatnosti**

$$T_s = \frac{\ln \frac{1}{1 - T_0 d}}{\ln(1 + d)} = \frac{\ln \frac{1}{1 - 4,99 \cdot 0,05}}{\ln(1 + 0,05)} \doteq 5,88 \text{ roků}$$

**Vnitřní výnosové procento**

$$u_i = \frac{CF}{N_i} \cdot \frac{r_i^{T_z} - 1}{r_i^{T_z}}, \text{ kde}$$

$$r_i = 1 + u_i$$

$u_i$  bylo vypočítáno postupnou iterací v MS Excel:

$$u_i \doteq 0,152$$

$$u_i \doteq 15,2\%$$

**4.2.5 Varianta s parním motorem o elektrickém výkonu 100 kW**

Je zde provedeno hodnocení projektu, při kterém by byl do stávajícího provozu instalován parní motor o elektrickém výkonu 100 kW. Parní motor bude provozován v protitlakém režimu a teplo odebírané z kondenzátoru bude dále jiným způsobem využíváno.

**4.2.5.1 Energetická bilance navrhovaného řešení**

Vstupní údaje	Jednotka	Hodnota
Elektrický výkon	kW	100
Elektrická účinnost	%	14 *)
Tepelná účinnost	%	61
Doba využití instal. výkonu	h/rok	6500
*) Při protitlakém provozu PM		

Tab. 4-12 Parametry PM potřebné pro výpočet, varianta 100 kW

**Instalovaný elektrický výkon PM**

$$P_{elPM} = 0,1 \text{ MW}$$

### Elektrická účinnost PM

$$\eta_{PM}^e = 14 \%$$

### Potřebný tepelný příkon pro PM

$$\dot{Q}_{PM}^P = \frac{P_{elPM}}{\eta_{PM}^e} = \frac{0,1}{0,14} = 0,71429 \text{ MW}$$

### Roční doba využití instalovaného výkonu PM

$$\tau_2 = 6500 \text{ h}$$

### Množství potřebného tepla pro provoz PM za rok

$$Q_{PM}^{sp} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \tau_2 = 0,71429 \cdot 6500 = 4642,86 \text{ MWh}$$

$$Q_{PM}^{sp} = 16714,3 \text{ GJ}$$

### Množství vyrobené elektrické energie parním motorem

$$E_2 = P_{elPM} \cdot \tau_2 = 0,1 \cdot 6500 = \underline{650 \text{ MWh}}$$

### Tepelná účinnost PM

$$\eta_{PM}^q = 61 \%$$

### Tepelný výkon parního motoru

$$\dot{Q}_{PM} = \dot{Q}_{PM}^P \cdot \eta_{PM}^q = 0,71429 \cdot 0,61 = 0,43571 \text{ MW}$$

### Množství využitého tepla z parního motoru za rok

$$Q_2 = \dot{Q}_{PM} \cdot \tau_2 = 0,43571 \cdot 6500 = \underline{2832,14 \text{ MWh}}$$

$$Q_2 = 10195,7 \text{ GJ}$$

### Množství tepla, které je nutné nahradit zemním plynem

$$Q_{nahrazené} = Q_{PM}^{sp} - Q_2 = 4642,86 - 2832,14 = \underline{1810,71 \text{ MWh}}$$

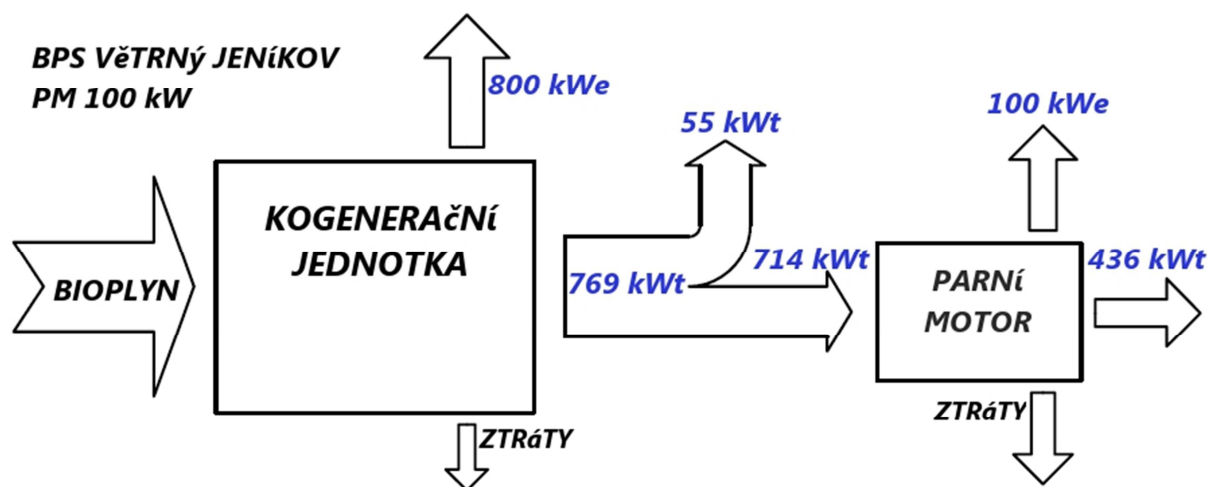
$$Q_{nahrazené} = 6518,6 \text{ GJ}$$

Množství tepla za rok, které je nutné přivést v zemním plynu – slouží k určení nákladů na palivo

$$Q_{ZP} = \frac{Q_{nahrazené}}{\eta_K} = \frac{1810,71}{0,9} = \underline{2011,9 \text{ MWh}}$$

$$Q_{ZP} = 7242,86 \text{ GJ}$$

$\eta_K [-]$  účinnost spalovacího zařízení



Obr. 4-12 Bilanční schéma s parním motorem 100 kW

**4.2.5.2 Ekonomická analýza navrhovaného řešení**

V tabulce Tab. 4-13 jsou uvedeny základní ekonomické údaje potřebné pro ekonomické hodnocení projektu.

Vstupní údaje	Označení	Jednotka	Hodnota
Výkupní cena elektřiny dodané do sítě	$c_E$	Kč/MWh	3550*)
Zelený bonus	$c_{ZB}$	Kč/MWh	2500*)
Cena prodáváného tepla	$c_Q$	Kč/GJ	400
Cena zemního plynu	$c_{ZP}$	Kč/MWh	900**)
Diskontní sazba	$d$	%	5
Investiční náklady	$N_i$	tis. Kč	8800
Roční provozní náklady, servis	$N_p$	tis. Kč	80
Hodnocená doba životnosti	$T_{\dot{z}}$	r	10

\*) Uvedené ceny jsou brány z cenového rozhodnutí ERÚ č. 7/2011 pro spalování bioplynu v bioplynových stanicích kategorie AF2

\*\*) Ceny ZP nejsou pro velké a střední odběratele paušálně stanoveny, jsou stanoveny na základě smlouvy, cena ZP je odhadnuta

Tab. 4-13 Vstupní ekonomické údaje, varianta 100 kW

**Přípravné výpočty****Stávající provoz (bez PM)****Tržby za elektřinu**

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$\begin{aligned} T_{E1} &= E_1 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\ &= 5800 \cdot (3550 + 2500) \\ &= 35090 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

Teplo z kogenerační jednotky:

$$\begin{aligned} T_{Q1} &= Q_1 \cdot c_Q = 17280 \cdot 400 \\ &= 6912 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{E1} + T_{Q1} = 35090 + 6912 \\ &= 42002 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

**Navrhované řešení (aplikace PM)****Tržby za elektřinu**

Elektřina z kogenerační jednotky:

$$T_{E2} = T_{E1} = 35090 \text{ tis. Kč}$$

Elektřina z parního motoru:

$$\begin{aligned} T_{E2PM} &= E_2 \cdot (c_E + c_{ZB}) \\ &= 650 \cdot (3550 + 2500) \\ &= 3932,5 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

**Tržby za teplo**

Teplo z kogenerační jednotky:

$$\begin{aligned} T_{Q2} &= (Q_1 - Q_{PM}^{sp}) \cdot c_Q \\ &= (17280 - 16714,3) \cdot 400 \\ &= 226,29 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

Teplo z parního motoru:

$$\begin{aligned} T_{Q2PM} &= Q_2 \cdot c_Q = 10195,7 \cdot 400 \\ &= 4078,29 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

Teplo ze zemního plynu:

$$\begin{aligned} T_{QZP} &= Q_{nahrazené} \cdot c_Q = 6518,6 \cdot 400 \\ &= 2607,43 \text{ tis. Kč} \end{aligned}$$

**Tržby celkem**

$$\begin{aligned}
 T_2 &= T_{E2} + T_{E2PM} + T_{Q2} + T_{Q2PM} + T_{ZP} \\
 &= 35090 + 3932,5 + 226,29 \\
 &\quad + 4078,29 + 2607,43 \\
 &= 45934,5 \text{ tis. Kč}
 \end{aligned}$$

**Celkové roční výnosy z aplikace parního motoru**

Určíme rozdílem celkových tržeb  $T_2$  a  $T_1$ :

$$V = T_2 - T_1 = 45934,5 - 42002 = \underline{3932,5 \text{ tis. Kč}}$$

**Celkové roční náklady při provozu s parním motorem**

Roční náklady na provoz a servis parního motoru  $N_p$  jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-13:

$$N_p = 80 \text{ tis. Kč}$$

U parního motoru je nutné též provádět obsluhu a kontrolu 2x denně. Mzdové náklady s tím spojené zde však nejsou uvažovány. Obsluha a kontrola zde budou provedeny v rámci obsluhy celé bioplynové stanice.

Náklady na palivo pro náhradu odebraného tepla:

$$N_{ZP} = Q_{ZP} \cdot c_{ZP} = 2011,9 \cdot 900 = 1810,71 \text{ tis. Kč}$$

$$N = N_p + N_{ZP} = 80 + 1810,71 = \underline{1890,71 \text{ tis. Kč}}$$

**Ekonomická analýza z hlediska projektu****Cash flow v každém roce provozu**

$$CF_0 = N_i = -8800 \text{ tis. Kč}$$

$$CF_1 = V - N = 3932,5 - 1890,71 = 2041,8 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované cash flow**

Například  $\Sigma CF$  pro 1. rok:

$$\Sigma CF_1 = \sum_{t=0}^1 CF_t = CF_0 + CF_1 = -8800 + 2041,79 = -6758,2 \text{ tis. Kč}$$

**Diskontované cash flow**

Například  $DCF$  pro 1. rok:

$$DCF_1 = CF_1 \cdot (1 + d)^{-j} = 2041,79 \cdot (1 + 0,05)^{-1} = 1944,6 \text{ tis. Kč}$$

**Kumulované diskontované cash flow**

Například  $\Sigma DCF$  pro 1. rok:

$$\Sigma DCF_1 = \sum_{t=0}^1 DCF_t = DCF_0 + DCF_1 = -8800 + 1944,56 = -6855,4 \text{ tis. Kč}$$

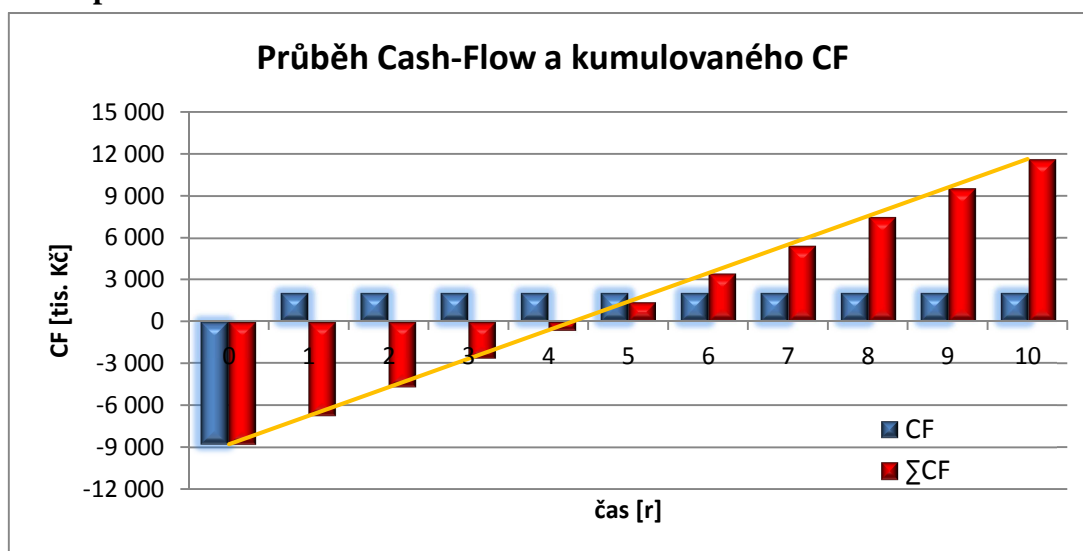
Ostatní výpočty jsou provedeny v MS Excel

Rok (j)	$N_i$ [Kč]	CF [Kč]	$\Sigma CF$ [Kč]	DCF [Kč]	$\Sigma DCF$ [Kč]
0	8 800 000	-8 800 000	-8 800 000	-8 800 000	-8 800 000
1		2 041 786	-6 758 214	1 944 558	-6 855 442
2		2 041 786	-4 716 429	1 851 960	-5 003 482

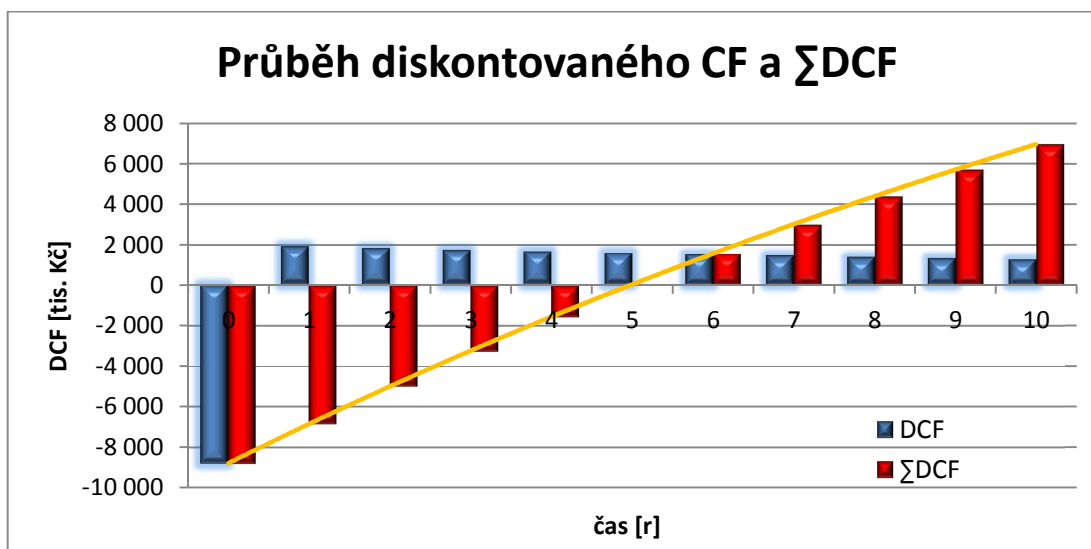
3		2 041 786	-2 674 643	1 763 771	-3 239 711
4		2 041 786	-632 857	1 679 782	-1 559 929
5		2 041 786	1 408 929	1 599 793	39 864
6		2 041 786	3 450 714	1 523 612	1 563 476
7		2 041 786	5 492 500	1 451 059	3 014 535
8		2 041 786	7 534 286	1 381 961	4 396 495
9		2 041 786	9 576 071	1 316 153	5 712 649
10		2 041 786	11 617 857	1 253 479	6 966 128

Tab. 4-14 Peněžní toky v jednotlivých letech provozu, varianta 100 kW

## Grafické zpracování



Obr. 4-13 Graf znázorňující peněžní toky v jednotlivých letech, bez diskontování, varianta 100 kW



Obr. 4-14 Graf znázorňující průběh peněžních toků v jednotlivých letech s diskontováním, varianta 100 kW

**Prostá doba splatnosti**

$$T_0 = \frac{N_i}{CF} = \frac{8800}{2041,8} \doteq 4,31 \text{ roků}$$

**Diskontovaná doba splatnosti**

$$T_s = \frac{\ln \frac{1}{1 - T_0 d}}{\ln(1 + d)} = \frac{\ln \frac{1}{1 - 4,31 \cdot 0,05}}{\ln(1 + 0,05)} \doteq 4,97 \text{ roků}$$

**Vnitřní výnosové procento**

$$u_i = \frac{CF}{N_i} \cdot \frac{r_i^{T_z} - 1}{r_i^{T_z}}, \text{ kde} \quad r_i = 1 + u_i$$

$u_i$  bylo vypočítáno postupnou iterací v MS Excel:

$$u_i \doteq 0,192 \quad \underline{u_i \doteq 19,2\%}$$

**4.3 Porovnání výsledků s technologií ORC****4.3.1 BPS Kouty**

Porovnávané údaje	PM	ORC	Jednotka
Instalovaný výkon	<b>50</b>	<b>50</b>	kW
Elektrická účinnost	16	11	%
Investiční náklad	5 500	4 500	tis. Kč
Roční doba využití	7 000	8 000	hod/rok
Prostá doba splatnosti	2,6	2,0	rok
Diskontovaná doba splatnosti	2,9	2,2	rok
Vnitřní výnosové procento (IRR)	36,0	48,6	%

**Tab. 4-15** Srovnání vypočítaných výsledků pro parní motor s technologií ORC, BPS Kouty, varianta 50 kW

Porovnávané údaje	PM	ORC	Jednotka
Instalovaný výkon	<b>100</b>	<b>110</b>	kW
Elektrická účinnost	16	11	%
Investiční náklad	8 800	6 200	tis. Kč
Roční doba využití	6 500	8 000	hod/rok
Prostá doba splatnosti	2,3	1,8	rok
Diskontovaná doba splatnosti	2,5	1,9	rok
Vnitřní výnosové procento (IRR)	42,5	54,7	%

**Tab. 4-16** Srovnání vypočítaných výsledků pro parní motor s technologií ORC, BPS Kouty, varianta 100 kW

**4.3.2 BPS Větrný Jeníkov**

Porovnáváné údaje	PM	ORC	Jednotka
Instalovaný výkon	<b>50</b>	<b>50</b>	kW
Elektrická účinnost	14	11	%
Investiční náklad	5 500	4 500	tis. Kč
Roční doba využití	7 000	7 750	hod/rok
Prostá doba splatnosti	5,0	3,4	rok
Diskontovaná doba splatnosti	5,9	3,8	rok
Vnitřní výnosové procento (IRR)	15,2	26,7	%

**Tab. 4-17** Srovnání vypočítaných výsledků pro parní motor s technologií ORC, BPS Větrný Jeníkov, varianta 50 kW

Porovnáváné údaje	PM	ORC	Jednotka
Instalovaný výkon	<b>100</b>	<b>110</b>	kW
Elektrická účinnost	14	11	%
Investiční náklad	8 800	6 200	tis. Kč
Roční doba využití	6 500	7 750	hod/rok
Prostá doba splatnosti	4,3	2,4	rok
Diskontovaná doba splatnosti	5,0	2,6	rok
Vnitřní výnosové procento (IRR)	19,2	40,7	%

**Tab. 4-18** Srovnání vypočítaných výsledků pro parní motor s technologií ORC, BPS Větrný Jeníkov, varianta 100 kW**4.3.3 Hodnocení výsledků**

Vypočítané výsledky a důležité hodnoty jsou shrnuty ve výše uvedených tabulkách (tab. 4-15 – tab. 4-18). Pro srovnání jsou zde uvedeny výsledky, které byly získány obdobným výpočtem pro technologii ORC v jiné práci [28].

Pokud se podíváme na bioplynovou stanici Kouty, návratnosti vložené investice jsou velmi vysoké jak u parního motoru tak u ORC jednotky. To způsobuje zejména fakt, že velká část tepelné energie zde není efektivně využita. Oproti parnímu motoru vychází lepší návratnosti u ORC jednotky. To může být způsobeno nižšími investičními náklady a také zde byla uvažována delší doba ročního využití. Naopak parní motor má větší elektrickou účinnost. Ještě lépe vychází návratnosti pro obě technologie u varianty 100 kWe.

U bioplynové stanice Větrný Jeníkov již nejsou návratnosti tak vysoké. To je způsobeno tím, že produkované teplo je zde efektivně využito, je tak nutné započítat náhradu tepla využitého danou technologií (parní motor, ORC) jiným zdrojem (bylo počítáno se zemním plynem, ve stávající kotelně je instalován plynový kotel). Jinak podobně jako u BPS Kouty vychází lépe ORC technologie a z pohledu velikosti výkonu vychází lépe větší výkonová varianta tedy 100 kW.

U všech posuzovaných variant vychází vnitřní výnosové procento (IRR) vyšší než uvažovaná diskontní sazba. Dle toho tak můžeme usuzovat, že všechny uvažované projekty by mohly být ekonomicky přínosné.

#### **4.3.4 Porovnání parního motoru a ORC cyklu**

Největší rozdíly lze spatřovat zejména v použité pracovní látce. Organické sloučeniny, které jsou používány v ORC cyklu jsou oproti páře nekorozivní, neagresivní a nemusí se nijak upravovat nebo doplňovat. U ORC modulů je naopak vysoký požadavek na těsnost, protože pracovní média používaná v ORC cyklech jsou vesměs hořlavá, při použití této technologie tak bude nutné provést určitá bezpečnostní opatření v podobě požární bezpečnosti. U parního motoru, kde je použita voda, tento problém nenastává.

Parní motor je oproti ORC jednotce složen z více pohyblivých částí, mohl by tak být náchylnější k poruchám. Princip a funkce parního jsou dobře známi již od 18. století, je to tedy dostatečně odzkoušená a popsaná technologie v porovnání s ORC cyklem což je poměrně nová, ne příliš odzkoušená technologie. I to by mohlo hrát roli při rozhodování pro danou technologii.



## 5 ZÁVĚR

Teoretická část práce se zabývá popisem bioplynových stanic, samotným procesem vzniku bioplynu a možnostmi jeho energetického využití. Bioplyn, který je v bioplynových stanicích produkován, je ve většině případů používán spalováním v kogeneračních jednotkách na bázi spalovacích pístových motorů za účelem získání elektrické energie a tepla. Část teoretické části je proto věnována kombinované výrobě elektrické energie a tepla, kde jsou popsány principy kogenerace, její přednosti a popsány jednotlivé způsoby společné výroby elektrické energie a tepla.

Bioplynové stanice jsou často lokalizovány v areálech zemědělských společností mimo obydlené oblasti. Většinou tak nastává problém s využitím produkovaného tepla, kterého je relativně velké množství. Běžnou praxí tak bývá to, že je teplo bez užitku vypouštěno do atmosféry. Touto problematikou je nutné se zabývat i z toho důvodu, že velká část vstupních substrátů pro bioplynové stanice je záměrně pěstována pro energetické účely na orné půdě. Další část se tak zabývá možnostmi využívání odpadního tepla. Nabízí se hned několik možností. Nejběžnějším způsobem je vytápění a ohřev TUV v areálu BPS nebo v přilehlých objektech, v tomto případě však není zaručen celoroční odběr tepla. Další možností mohou být sušárenské technologie pro sušení řeziva, produktů rostlinné výroby, dřevní štěpky, digestátu apod. Přebytky tepla je také možné využít například pro vytápění skleníků nebo chov teplomilných živočichů. Odpadní teplo z kogeneračních jednotek je také možné využít pro absorpční chlazení (klimatizace budov, skladování nebo zpracování potravin atd.)

Větší pozornost je věnována technologiím, pomocí nichž může být odpadní teplo z bioplynové stanice transformováno na elektrickou energii. Toho je možné dosáhnout například pomocí pístového parního motoru. Principiálně se jedná o klasický parní stroj, který je znám již od osmnáctého století. Dnes se však setkáváme se stroji malých výkonů a moderního provedení. Pára je vyrobena pomocí odpadního tepla, práce, kterou pára vykoná je pak z motoru odvedena na hřídeli, která pohání elektrický generátor. Elektrickou energii z odpadního tepla můžeme získat také pomocí ORC technologie. Jedná se o tepelný oběh, který je založen na stejném principu jako klasický Rankin – Clausiův cyklus, s tím rozdílem, že jako pracovní látka zde není použita voda, ale směs organických sloučenin neboli silikonový olej. Jádrem pak tvoří malá parní turbína, která opět pohání elektrický generátor.

V poslední, praktické části práce je uveden vlastní návrh na zvýšení výroby elektrické energie pomocí parního motoru a je zde provedeno hodnocení ekonomické efektivity navrhovaného řešení. Návrhy byly provedeny u dvou konkrétních bioplynových stanic, vždy ve dvou výkonových variantách 50 a 100 kWe. Jedná se o bioplynovou stanici Kouty a stanici Větrný Jeníkov. Na BPS Kouty část tepla využívají pro vytápění, větší část je však nevyužita. Na BPS Větrný Jeníkov používají veškeré teplo v provozu místního lihovaru. Návrh zde byl tak skutečně spíše z hlediska zlepšení ekonomie díky zvýhodněným výkupním cenám elektrické energie z obnovitelného zdroje. Výsledky ukazují, že využití parního motoru by bylo ekonomicky přínosné a zejména na BPS Kouty vycházejí návratnosti velmi vysoké. U obou provozů pak lépe vychází vždy vyšší výkonová varianta tedy 100 kWe.

V závěru jsou srovnány výsledky pro parní motor s výsledky pro technologii ORC cyklu, které jsou převzaty z jiné práce.

Získané výsledky je nutné považovat spíše jako orientační kvůli určitým zjednodušením, která zde byla provedena. Pro vypracování objektivního podkladu pro potencionálního investora by bylo nutné získat detailní podklady jak ze strany provozovatele bioplynové stanice, tak ze strany výrobce dané technologie, ať už se jedná o parní motor nebo jednotku ORC.

Na závěr můžeme konstatovat, že využití parního motoru má smysl a to zejména tam, kde mají problémy s využitím větší části odpadního tepla.

## 6 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] BAČÍK, O. *Bioplynové stanice: technologie celonárodního významu*. Biom.cz [online]. 2008-01-14 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z WWW: <<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/bioplynove-stanice-technologie-celonarodniho-vyznamu>>. ISSN: 1801-2655.
- [2] *Metodický pokyn MŽP k podmínkám schvalování bioplynových stanic před uvedením do provozu*. [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/legislativa\\_metodika\\_oze/\\$FILE/oued-metodika\\_schvalovani\\_BPS-20100312.pdf](http://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/legislativa_metodika_oze/$FILE/oued-metodika_schvalovani_BPS-20100312.pdf)>
- [3] DOHÁNYOS, M. *Anaerobní reaktor není černou skřínkou - teoretické základy anaerobní fermentace*. Biom.cz [online]. 2008-11-17 [cit. 2011-11-18]. Dostupné z WWW: <[http://biom.cz/cz-spalovani-biomasy/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace?apc=/cz-spalovani-biomasy/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace&nocache=invalidate&sh\\_itm=4c5863fabb9cf330d022de133456ec59&add\\_di\\_sc=1](http://biom.cz/cz-spalovani-biomasy/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace?apc=/cz-spalovani-biomasy/odborne-clanky/anaerobni-reaktor-neni-cernou-skrinkou-teoreticke-zaklady-anaerobni-fermentace&nocache=invalidate&sh_itm=4c5863fabb9cf330d022de133456ec59&add_di_sc=1)>. ISSN: 1801-2655.
- [4] Beranovský, J. Murtinger, K. *Energie z biomasy*. Brno: ERA group spol. s.r.o, 2008. 92 s. ISBN 978-80-7366-115-1
- [5] Jandačka, J. Mikulík, M. *Technologie pre zvyšovanie energetického potenciálu biomasy*. 2007. 110 s. ISBN 978-80-969595-4-9
- [6] *Co je bioplyn?* [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW: <<http://www.czba.cz/bioplyn/>>
- [7] *Anaerobní technologie*. [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.bioplyn.cz/at\\_popis.htm](http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm)>
- [8] FIEDLER, J. *Výhody a omezení malých kogeneračních jednotek*. tzbinfo [online]. 2011-09-26 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://vytapani.tzb-info.cz/7866-vyhody-a-omezeni-malych-kogeneracnich-jednotek>>
- [9] *Kogenerační listy – informační noviny o kombinované výrobě elektřiny a tepla*. číslo 1/ročník 1. 2005. [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.cogen.cz/download/38.pdf>>
- [10] *Teplárenské sdružení České republiky*. [online]. [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://www.tscr.cz/index.php?lang=cz&pg=0620>>
- [11] KARAFIÁT, J. *Sborník technických řešení zdrojů s kombinovanou výrobou elektřiny a tepla*. [online]. 2006. Dostupné z WWW: <<http://www.mpo-efekt.cz/dokument/15.pdf>>
- [12] KRBEK, J. POLESNÝ, B. *Kogenerační jednotky, zřizování a provoz*. [online]. 2007. Dostupné z WWW: <[http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni\\_jednotky\\_zrizovani\\_provoz\\_2220047233.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/upload/7799f3fd595eeee1fa66875530f33e8a/Kogeneracni_jednotky_zrizovani_provoz_2220047233.pdf)>
- [13] FIEDLER, J. POSPÍŠIL, J. *Systémy společné výroby elektrické energie, tepla a chladu*. tzbinfo [online]. 2010-05-31 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu>>
- [14] *Turbec*. [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <<http://www.turbec.com/products/process.htm>>
- [15] *ClimateLab*. [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW: <[http://climatelab.org/Fuel\\_Cells](http://climatelab.org/Fuel_Cells)>
- [16] *Jak využít přebytky tepla?* [online]. [cit. 2011-11-20]. Dostupné z WWW: <[http://www.bioplyn.cz/at\\_teplo.htm](http://www.bioplyn.cz/at_teplo.htm)>

- 
- [17] KATRES. [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.katres.cz/produkty/susarny-reziva/komorove-susarny/komorova-susarna-typ-kae/>>
- [18] Parní stroj. Wikipedie. [online]. [cit. 2012-03-30]. Dostupné z WWW:  
<[http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD\\_stroj](http://cs.wikipedia.org/wiki/Parn%C3%AD_stroj)>
- [19] ŠKORPÍK, J. *Pístový parní motor (Parní stroj)*. Transformační technologie. 2010. Brno: Jiří Škorpík, [online] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z WWW:  
<<http://www.transformacni-technologie.cz/pistovy-parni-motor-parni-stroj.html>>
- [20] Parní motor. PolyComp. [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.polycomp.cz/page.php?lang=cz&f=5pmvs>>
- [21] HRBÁČEK, J. *Pístový parní motor*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008, s. 65. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Fiedler, Dr.
- [22] Sláma, J. *Organický Rankinův cyklus*. [online]. [cit. 2012-03-18]. Dostupné z WWW:  
<[www.tzs.sk/0708\\_slama\\_tts.pps](http://www.tzs.sk/0708_slama_tts.pps)>
- [23] KUNC, J. NOVÁK, L. *Biomasa – efektivní palivo pro ORC technologii*. tzbinfo [online]. 2005-04-11 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <http://www.tzb-info.cz/2455-biomasa-efektivni-palivo-pro-orc-technologie>
- [24] TRNOBRANSKÝ, K. VALENTOVÁ, M. DUFOUR, R. *Zlepšení ekonomie provozu kogeneračních jednotek využitím doprovodných technologií pro zrovnoměrnění ročního odběru tepla*. [online]. Dostupné z WWW: <[www.mpo-efekt.cz/dokument/99\\_8062.pdf](http://www.mpo-efekt.cz/dokument/99_8062.pdf)>
- [25] POSPÍŠIL, J. *Chladicí oběhy, trigenerace, dálkové chlazení*. tzbinfo [online]. 2011-10-10 [cit. 2012-02-15]. Dostupné z WWW: <<http://oze.tzb-info.cz/kogenerace/6519-systemy-spolecne-vyroby-elektricke-energie-tepla-a-chladu>>
- [26] *Energetická efektivnost bioplynových stanic*. Seven. [online]. Dostupné z WWW:  
<<http://www.czba.cz/files/ceska-bioplynova-asociace/uploads/files/EnEfBPS-komplet.pdf>>
- [27] Krbek, J. Polesný, B. Fiedler, J. *Strojní zařízení tepelných centrál Návrh a výpočet*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1999. 217 s. ISBN 80 – 214 – 1334 – 4
- [28] BECK, M. *Zvýšení podílu výroby elektrické energie na BPS pomocí ORC cyklu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 52 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Lisý, Ph.D.

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

BPS		bioplynová stanice
ČOV		čistírna odpadních vod
KVET		kombinovaná výroba elektrické energie a tepla
TUV		teplá užitková voda
$e$	[-]	teplárenský modul
$E$	[kJ, kWh]	elektřina vyrobená v procesu KVET
$Q$	[kJ, kWh]	teplo vyrobené v procesu KVET
$\eta_K^e$	[-]	účinnost výroby elektrické energie ve zdroji KVET
$Q_{pal}$	[kJ, kWh]	množství tepla přivedeného palivem
$\eta_K^q$	[-]	účinnost výroby užitečného tepla ve zdroji KVET
$Q_D$	[kJ, kWh]	množství užitečného tepla vyrobeného ve zdroji KVET
$\eta_K^{celk}$	[-]	celková účinnost zdroje KVET
$\Delta Q^K$	[GJ]	úspora primárního paliva
$Q^E$	[GJ]	teplo přivedené palivem do kondenzační elektrárny
$Q^V$	[GJ]	teplo přivedené palivem do výtopny
$Q^K$	[GJ]	teplo přivedené palivem do kogeneračního zdroje
$\eta_{KE}$	[-]	účinnost kondenzační elektrárny
$\eta_V$	[-]	účinnost výtopny
$\eta_K$	[-]	účinnost kogeneračního zdroje
CZT		centrální zásobování teplem
PPC		paroplynový cyklus
PAFC		palivový článek s kyselinou fosforečnou jako elektrolytem
PM		parní motor
KJ		kogenerační jednotka
ORC		organický Rankin - Clausiův cyklus
TEG		termoelektrický generátor
$P_{el}$	[MW]	instalovaný elektrický výkon
$\dot{Q}_t$	[MW]	instalovaný tepelný výkon
$\tau_1$	[h]	roční doba využití instalovaného výkonu
$E_{celk}$	[MWh]	roční výroba elektrické energie
$E_1$	[MWh]	elektrická energie dodaná do distribuční sítě za rok
$E_{vlast}$	[MWh]	vlastní spotřeba elektrické energie za rok
$Q_{celk}$	[MWh, GJ]	roční produkce tepla
$Q_{efekt}$	[MWh, GJ]	množství efektivně využitého tepla za rok
$Q_{zmar}$	[MWh, GJ]	množství zmařeného tepla za rok
$Q_{vlast}$	[MWh, GJ]	vlastní spotřeba tepla za rok
$Q_1$	[MWh, GJ]	množství prodaného tepla

$P_{elPM}$	[MW]	instalovaný elektrický výkon v parním motoru
$\eta_{PM}^e$	[%]	elektrická účinnost parního motoru
$\eta_{PM}^q$	[%]	tepelná účinnost parního motoru
$\dot{Q}_{PM}$	[MW]	tepelný výkon parního motoru
$\dot{Q}_{PM}^p$	[MW]	tepelný příkon parního motoru
$\tau_2$	[h]	roční doba využití instalovaného výkonu PM
$Q_{PM}^{sp}$	[MWh, GJ]	množství spotřebovaného tepla za rok parním motorem
$E_2$	[MWh]	množství vyrobené elektrické energie parním motorem
$Q_2$	[MWh, GJ]	množství využitého tepla z parního motoru
$Q_{nahrazené}$	[MWh, GJ]	množství tepla nahrazovaného zemním plynem
$Q_{ZP}$	[MWh, GJ]	množství tepla přivedeného v zemním plynu
$\eta_K$	[%]	účinnost spalovacího zařízení
$c_E$	[Kč/MWh]	výkupní cena elektrické energie
$c_{ZB}$	[Kč/MWh]	zelený bonus
$c_Q$	[Kč/GJ]	cena prodáváného tepla
$c_{ZP}$	[Kč/MWh]	cena zemního plynu
$d$	[%]	diskontní sazba
$T_{E1}$	[tis. Kč]	tržby za elektřinu z KJ
$T_{Q1}$	[tis. Kč]	tržby za teplo z KJ
$T_1$	[tis. Kč]	tržby celkové
$T_{E2}$	[tis. Kč]	tržby za elektřinu z KJ při aplikaci PM
$T_{E2PM}$	[tis. Kč]	tržby za elektřinu z PM
$T_{Q2}$	[tis. Kč]	tržby za teplo z KJ při aplikaci PM
$T_{Q2PM}$	[tis. Kč]	tržby za teplo z PM
$T_{QZP}$	[tis. Kč]	tržby za teplo ze zemního plynu
$T_2$	[tis. Kč]	tržby celkové při aplikaci PM
$V$	[tis. Kč]	celkové roční výnosy
$N_p$	[tis. Kč]	provozní náklady
$N_{ZP}$	[tis. Kč]	náklady za palivo
$N$	[tis. Kč]	celkové roční náklady
$CF_j$	[tis. Kč]	cash flow v daném roce
$\Sigma CF_j$	[tis. Kč]	kumulované cash flow v daném roce
$DCF_j$	[tis. Kč]	diskontované cash flow v daném roce
$\Sigma DCF_j$	[tis. Kč]	kumulované diskontované cash flow v daném roce
$T_0$	[r]	prostá doba splatnosti
$T_s$	[r]	diskontovaná doba splatnosti
$IRR, u_i$	[%]	vnitřní výnosové procento
$T_{\check{z}}$	[r]	doba hodnocené životnosti